



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ

DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

POŘIZOVÁNÍ HDR SNÍMKŮ NA MOBILNÝCH ZAŘÍ- ZENÍCH

HDR IMAGE ACQUISITION ON MOBILE DEVICES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

FILIP MIK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. SVETOZÁR NOSKO

BRNO 2017

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Mik Filip**

Obor: Informační technologie

Téma: **Pořizování HDR snímků na mobilních zařízeních**
HDR Image Acquisition on Mobile Devices

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Prostudujte dostupnou literaturu týkající se pořizování HDR obrazu ze sekvence snímků s různou expozicí. Uvažujte statickou scénu.
2. Seznamte se s vývojem aplikací pro platformu Android a prostudujte možnosti pořízení sekvence snímků s proměnnou expozicí pomocí kamery zvoleného zařízení.
3. Implementujte aplikaci, která pořídí sekvenci snímků potřebnou pro složení HDR obrazu a aplikuje vybranou metodu tone-mappingu pro zobrazení na displeji zařízení.
4. Diskutujte dosažené výsledky a navrhnete možné pokračování práce.

Literatura:

- Reinhard, Erik, et al. *High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting*. Morgan Kaufmann, 2010.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Nosko Svetožár, Ing.**, UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
602 00 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký
vedoucí ústavu

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá tvorbou snímok s vysokým dynamickým rozsahom. Výsledný HDR snímok je vytvorený spracovaním sekvencie LDR snímok - ich spojením a následným mapovaním tonality. V práci je popísaná celá problematika týkajúca sa procesu vytvorenia a zobrazenia HDR snímku. Celý proces je následne implementovaný v aplikácii na platformu Android.

Abstract

This bachelor thesis deals with aquisition of high dynamic range images. The resulting HDR image is created by processing of LDR image sequence - by merging and then tone mapping. This thesis includes description of all issues related to the process of acquisition and displaying HDR image. Whole process is then implemented in form of Android application.

Kľúčové slová

Vysoký dynamický rozsah, HDR, nízky dynamický rozsah, LDR, statická scéna, digitálna fotografia, tónové mapovanie, Android aplikácia, sekvencia snímok, spracovanie obrazu

Keywords

High dynamic range, HDR, low dynamic range, LDR, static scene, digital photography, tone mapping, Android application, image sequence, image processing

Citácia

MIK, Filip. *Pořizování HDR snímků na mobilných zařízeních*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Sveztozár Nosko

Pořizování HDR snímků na mobilných zařízeních

Prehlásenie

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Svetozára Noska. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Filip Mik
5. mája 2018

Podakovanie

Moje podakovanie patrí všetkým, ktorí mi pomáhali pri vytváraní tejto práce. Obzvlášť vedúcemu práce, Ing. Svetozárovi Noskovi, za všetky poskytnuté rady a potrebné informácie, bez ktorých by táto práca nemohla vzniknúť.

Obsah

1	Úvod	2
2	Problematika spojená s HDR	3
2.1	Vnímania scény u človeka a u fotoaparátu	3
2.2	Snímanie HDR snímkov	7
2.3	Zobrazenie HDR snímkov	11
3	Návrh a špecifikácia zadania	16
3.1	Návrh činnosti aplikácie	16
3.2	Návrh grafického užívateľského rozhranie	17
3.3	Použité technológie	17
3.4	Návrh triedneho modelu aplikácie	19
4	Implementácia	20
4.1	Triedny model aplikácie	20
4.2	Snímanie fotografií	22
4.3	Realizácia tónového mapovania	23
5	Testovanie a analýza výsledkov	28
5.1	Doba snímania a skladania	28
5.2	Vplyv počtu fotografií	29
5.3	Porovnanie použitých operátorov	31
5.4	Hodnotenie výsledkov užívateľmi	38
5.5	Možné vylepšenia	39
6	Záver	40
	Literatúra	41
A	Ukážka HDR snímkov	44
B	Obsah priloženého CD	47

Kapitola 1

Úvod

Od počiatku vekov sa ľudia snažia permanentne zaznamenať momenty svojho života. Najskôr vo forme jaskynných malieb, následne obrazmi a portrétmi. Revolučným objavom sa stal objav fotografie, ktorý zjednodušil zaznamenávanie scény. Prvý krát sa tak stalo v roku 1825 [14]. Vývoj od roku 1825 neuveriteľne postúpil a fotoaparát je považovaný za každodennú súčasť nášho života. Napriek tomu, že moderné fotoaparáty sú diametrálne odlišné od tých prvých, cieľ fotografovania ostáva rovnaký. Zaznamenanie obrazu v takej kvalite, akou je obraz vnímaný ľudským okom.

Hoci od vyvinutia prvého fotoaparátu prešlo už takmer 200 rokov, stále len veľmi malé percento snímačov dokáže zachytiť podobný dynamický rozsah ako ľudské oko. Tento problém naberá na vážnosti hlavne v prípadoch, kedy scéna, ktorá je fotená fotografom, obsahuje svetlé a rovnako aj tmavé oblasti. Bežný fotoaparát vie automaticky upraviť expozíciu, no nakoľko je jeho dynamický rozsah nízky, na vytvorenej fotke vznikajú miesta, ktoré sú buď príliš presvetlené alebo príliš stmavnuté. Vo výsledku tak fotografia stráca veľké množstvo detailov.

Snímač fotoaparátu, s ktorým je možné sa bežne stretnúť, nedokáže na jednej fotke zachytiť celý dynamický rozsah, tak ako ho vidí naše oko. Takýto dynamický rozsah označujeme ako nízky dynamický rozsah, anglicky Low Dynamic Range (skrátene LDR). Celý dynamický rozsah, tak ako ho vidí naše oko, sa nazýva vysokým dynamickým rozsahom. Anglicky High Dynamic Range (skrátene HDR). Problematike tvorenia HDR snímok, a pojmy s ňou späté, budú podrobnejšie rozoberané v kapitole 2, hlavne v podkapitole 2.2.

Do problematiky HDR nezapadá len zaobstarávanie takýchto snímok, ale aj ich následné zobrazovanie. Nakoľko bežné displeje nie sú prispôsobené na zobrazovanie HDR snímok, je potrebná úprava týchto snímok pred ich samotným zobrazením. Problematikou upravenia HDR snímku pri zobrazení na LDR displej sa bude zaoberať podkapitola 2.3.

Kapitola 2

Problematika spojená s HDR

Problematiku HDR tvorí hneď množina problémov, ktoré nastávajú, pokiaľ má dôjsť k zachyteniu alebo zobrazeniu HDR snímok. Rovnaká scéna je rôznymi fotoaparátmi odlišne nasnímaná, kvôli iným nastaveniam. Po zaobstaraní HDR snímku je vyzobrazený zase na rozdielnych displejoch, kde môže byť inak vykreslený. Tieto problémy a pojmy sa nich týkajúce je nutné spomenúť a vysvetliť. To je motiváciou nasledujúcej kapitoly.

2.1 Vnímania scény u človeka a u fotoaparátu

Ako bolo v úvode spomenuté, snímače drvivej väčšiny fotoaparátov nedokážu nasnímať scénu v takej kvalite a s takým dynamickým rozsahom, ako ju vníma ľudské oko. Na nasledujúcom obrázku 2.1 sú vyzobrazené fotografie scény nasnímanej bežným fotoaparátom, pričom každá fotografia bola spravená s rôznou expozíciou, líšiacou sa dĺžkou uzávierky. Motiváciou fotenia scény vo viacerých snímkoch s rôznou expozíciou, je zachytenie väčšieho množstva detailov, ktoré na jednu snímku nie je možné zachytiť. Jedná sa o LDR fotografie.



Obr. 2.1: Doba uzávierky, z ľava: $\frac{1}{16}$ sekundy, $\frac{1}{128}$ sekundy a $\frac{1}{1024}$ sekundy

Na obrázku 2.2 je zobrazená rovnaká scéna, no v takej podobe, v akej je vnímaná človekom, teda v HDR kvalite.



Obr. 2.2: Fotografia rovnakej scény v HDR kvalite

Vnímanie scény ľudským okom

Aby bolo ľudské oko schopné zobrazit scénu nachádzajúcu sa pred ním, je nutné aby obsahovala dostatok svetla. Toto svetlo následne prechádza rôznymi lámovými plochami oka. Konkrétne cez rohovku, ventrikulárnu tekutinu, šošovku a sklovec. Po prechode touto optickou sústavou je svetelnými lúčami na sietnici vytvorený skutočný, zmenšený a obrátený obraz, ktorý je následne človekom vnímaný [27].

Vnímanie scény snímačom digitálneho fotoaparátu

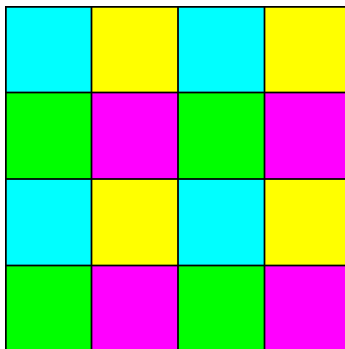
Na zachytenie obrazu scény v digitálnom fotoaparáte, je nutný dopad svetla na snímač fotoaparátu. Snímač je zložený z veľkého počtu svetlocitlivých bodov, ktoré zaznamenávajú množstvo svetla, ktoré na ne dopadlo. Zaznamenaná hodnota je následne konvertovaná na odpovedajúci počet elektrónov. Platí vzťah, kde čím viac svetla dopadne na svetlocitlivý bod, tým viac elektrónov sa vytvára. Elektróny sú konvertované na napätie, ktoré je prevedené na digitálne hodnoty pomocou A/D prevodníka. Vzniknutý digitálny signál je spracovaný elektrickými obvodmi vo vnútri fotoaparátu [9].

Samotné snímače, či už pracujúce na CMOS¹ alebo CCD² technológii, dokážu zaregistrovať len rozsah svetla, ktorý dopadol na jednotlivé svetlocitlivé body. Neposkytujú žiadne informácie o farbách. Pre potrebu získania farebných informácií, je pred snímač umiestnený farebný filter, umožňujúci meranie intenzity práve jednej farebnej zložky. Najviac rozšírené

¹Complementary Metal Oxid Semiconductor

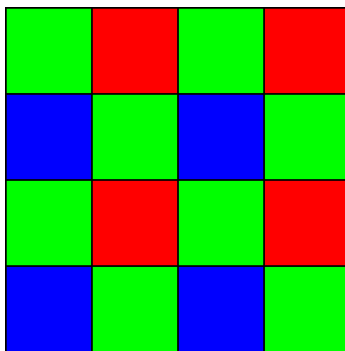
²Charged Coupled Device

sú filtre RGB³. Odlišným filtrom, ktorý sa používa menej, môže byť napríklad filter CMYG⁴ zobrazený na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: CMYG filter⁵

V súčasnosti najpoužívanším RGB filtrom je Bayerov filter (obrázok 2.4). Každý subpixel je prekrytý filtrom jednej zložky farebného modelu RGB, práve tej, ktorej hodnotu má merať. Pokiaľ sa nad subpixelom nachádza červený filter, daný subpixel môže snímať len intenzitu červenej zložky svetla. Modrá alebo zelená zložka cez filter neprejde a nedôjde tým pádom k nameraniu žiadnej hodnoty. Nakoľko je ľudské oko najviac citlivé na svetlo o vlnovej dĺžke 555 nanometrov, čo odpovedá žltu-zelenej až zelenej farbe [25], až polovica Bayerovho filtra je tvorená práve zelenou farbou. Zvyšok filtra je rovnomerne rozdelený pre červenú a modrú farbu. Vo výsledku dochádza k tomu, že pri použití Bayerovho filtra je ľudské oko schopné zachytiť viacej detailov, ako keby boli vo filtri rovnomerne zastúpené jednotlivé zložky farby [2].



Obr. 2.4: Bayerov filter⁶

Časti fotoaparátu ovplyvňujúce výslednú fotografiu

Snímač fotoaparátu je zodpovedný za konverziu svetla, ktoré naň dopadá, na digitálne informácie, z ktorých je neskôr vytvorená výsledná fotografia. Rôzne scény, ktoré fotografujeme, však majú rôzne vlastnosti. Pre dosiahnutie kvalitnej finálnej fotografie, je nutné aby tieto

³Z anglického Red Green Blue, teda filtre pozostávajúce z červenej, zelenej a modrej farby

⁴Z anglického Cyan Magenta Yellow Green, teda filter pozostávajúci z tyrkysovej, fialovej, žltej a zelenej farby

⁵Zdroj: https://en.wikipedia.org/wiki/CYGM_filter

⁶Zdroj: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bayer_pattern.svg

odlišné vlastnosti scén boli aj odlišne snímané. To je umožnené mechanickými komponentami fotoaparátu, ktoré upravujú množstvo svetla dopadajúceho na snímač a podobne, čo umožňuje zmenu vlastností snímania spolu s meniacimi sa vlastnosťami snímanej scény.

Clona

Clonou sa rozumie sústava väčšinou šiestich lopatiek v objektíve, ktorá reguluje, koľko svetla vstúpi do fotoaparátu a dopadne na jeho snímač. Tieto lopatky sú usporiadané do tvaru vytvárajúceho v strede, medzi nimi, otvor, ktorým svetlo vstupuje. Čím väčší otvor, tým viac svetla vstúpi a naopak. Clona je meraná v F jednotkách, podľa vzťahu v rovnici 2.1, kde jednotka clony (F) je vyjadrená ako pomer ohniskovej vzdialenosti (f) a priemeru otvorenej clony [23].

$$F = \frac{f}{D} \quad (2.1)$$

Okrem vstupu svetla ovplyvňuje clona aj hĺbku ostrosti. Hĺbka ostrosti je hodnota, ktorá určuje, koľko snímanej scény bude zaostrenej. Nízka hĺbka ostrosti má za efekt, že budú zaostrené len objekty nechádzajúce sa blízko fotoaparátu. Výsledkom použitia vysokej hĺbky ostrosti je fotografia, ktorá je zaostrená aj na objekty vo väčšej vzdialenosti od fotoaparátu [20].

Uzávierka

Uzávierka fotoaparátu je mechanická súčiastka regulujúca dobu, počas ktorej dopadá svetlo na snímač cez clonu. Akonáhle je na fotoaparáte stlačené tlačidlo na spravenie fotky, uzávierka sa otvorí a plne vystaví snímač dopadajúcemu svetlu. Po vystavení snímaču na svetlo sa po určitej dobe uzávierka zatvára. Táto doba sa nazýva rýchlosť uzávierky.

Rýchlosť uzávierky je teda doba, po ktorú je uzávierka otvorená a umožňuje dopadanie svetla na snímač fotoaparátu. Rýchlosť uzávierky je meraná v zlomkoch sekundy. $\frac{1}{4}$ znamená, že senzor sa vystaví svetlu po dobu štvrtiny sekundy. Za použitia krátkej doby uzávierky je fotografia zachytená tak, že všetky pohyby budú zmrazené. Kratšia doba vystavenie snímaču na svetlo však ale znamená, že fotografia bude tmavšia. Pri použití dlhej doby uzávierky sa zo scény zachytí viacej svetla, no za cenu toho, že môže vzniknúť rozmazanie objektov nachádzajúcich sa v pohybe [15].

ISO

ISO⁷ je miera citlivosti snímaču na svetlo. Čím vyššie je ISO, tým je snímač citlivejší na svetlo. V súčasnosti sa dá ľahko elektronicky zmeniť nastaveniami fotoaparátu. Za použitia nízkej hodnoty ISO je potrebné použiť dlhšiu dobu uzávierky alebo širšiu clonu oproti zaobstarania fotografie s vyššou hodnotou ISO. V moderných fotoaparátoch sa nastaviteľná hodnota ISO pohybuje medzi 100 až 12800 jednotkami [10].

Vzťah medzi jednotlivými jednotkami ISO je nasledovný: fotografia s ISO 200 je dvojnásobne svetlá ako fotografia s ISO 100, nakoľko snímač pri nastavení ISO na dvojnásobnú hodnotu bol dvojnásobne citlivejší na dopadajúce svetlo. Rovnako fotografia s hodnotou ISO 1600 je dvojnásobne svetlejšia oproti fotografii s ISO hodnotou 800.

⁷Skratka pre International Organization of Standards

Pri použití vysokých hodnôt ISO vznikne fotografia, ktorá je svetlejšia, no na úkor straty detailov a vzniku šumu. Naopak, pri použití nízkej hodnoty ISO má fotografia viac detailov a menej šumu ale je podstatne tmavšia.

Expozičná hodnota EV

EV⁸ je absolútna veličina udaná ako kombinácia hodnôt clony, uzávierky a ISO. Poukazuje na množstvo svetla, ktoré dopadne na senzor fotoaparátu pri fotení jednej snímky. Hodnota 0 EV je expozičná hodnota vzniknutá pri použití ISO hodnoty 100, clony f/1 a dĺžke uzávierky 1 sekunda. Stupnica EV však nie je prírastková, ale násobková. Čo znamená, že pokiaľ sa dopadajúce svetlo zdvojnásobí, dôjde k dvojnásobnému zvýšeniu hodnoty EV. Analogicky to platí aj opačne, pri zmenšení množstva dopadajúceho svetla [6].

2.2 Snímanie HDR snímkov

Pod snímaním HDR snímkov sa rozumie činnosť zachytávania reálnej scény tak, aby výsledný obraz mal vysoký dynamický rozsah. Ak sa neberie v úvahu vznik HDR snímkov pomocou renderovania s použitím počítačovej grafiky, existujú 2 rôzne spôsoby vzniku výsledného HDR snímku.

Prvý spôsob je priame snímanie scény. Takéto snímanie vyžaduje špeciálny fotoaparát, ktorý je schopný zachytiť celý dynamický rozsah v jednom snímku. Takéto fotoaparáty sa vďaka pokroku vo vývoji technológii už dnes pomaly objavujú, ale stále sú príliš drahé na to, aby boli zaobstarané bežným zákazníkom.

Druhým spôsobom je poskladanie HDR snímky z viacerých LDR snímok s rôznou expozíciou. Nakoľko dochádza ku skladaniu LDR snímok, ktoré je možné vytvoriť na bežnom fotoaparáte alebo mobilnom telefóne, je táto možnosť hardwarovo nenáročná. Technológia skladanie viacerých LDR snímok do výsledného HDR snímku sa nazýva bracketing [18].

Priame HDR snímanie scény

Použitím priameho HDR snímania scény odpadá nutnosť skladanie LDR obrázkov s rôznymi dĺžkami expozície. Tým sa znižuje riziko vzniku grafických artefaktov vo forme duchov, ktoré vznikajú pri premietnutí objektov snímanej scény medzi jednotlivými fotografiami [24]. Príkladom fotoaparátu umožňujúceho priame HDR snímanie je SpheroCam HDR, zobrazený na obrázku 2.5.

Tento fotoaparát má dynamický rozsah 1:100000 čo je približne 26 EV. Funguje na princípe Image-based lighting, ktorý spočíva v zachytení všestrannej reprezentácie dopadajúceho svetla z reálneho sveta do formy obrázku, za pomoci špecializovaného fotoaparátu. Takýto obrázok je potom premietnutý do sféry analogickej k mapovaniu snímanej scény, čo sa používa na simuláciu osvetlenia objektov na danej scéne [4].

Takáto technológia má však aj svoje nevýhody. Okrem vysokej ceny, je nevýhodou i doba snímania, ktorá takýmto fotoaparátom môže trvať až 3 minúty [8].

V dnešnej dobe je priame HDR snímanie scény ešte ďaleko od toho, aby sa dostalo k bežným užívateľom.

⁸Z anglického Exposure Value

⁹Zdroj: <http://cinetechnews.com/wp-content/uploads/2011/02/SPHERON.jpg>



Obr. 2.5: SphereCam HDR⁹

Bracketing

Nakoľko fotoaparáty a senzory umožňujúce priame HDR snímame sú ešte ďaleko vzdialené bežným užívateľom, majorita HDR snímok vzniká v súčasnosti za použitia bežne dostupnej techniky - fotoaparátov umožňujúcich snímame LDR snímok.

Snímky s nízkym dynamickým rozsahom však nedokážu v jednej expozícii zachytiť celý dynamický rozsah snímanej scény. Môže však dôjsť k zaobstaraniu sekvencie fotiek, kde jednotlivé fotky, svojimi rôznymi nastaveniami expozície, dokážu pokryť väčšinu dynamického rozsahu. Dôležité je, aby jednotlivé fotky zobrazovali statickú scénu, čím sa eliminuje vznik grafických artefaktov vo forme šumu alebo duchov. Metódou kombinovania sekvencie LDR fotiek s rôznymi nastaveniami expozície a zaoberajú P. E. Debevec a J. Malik [5]. Táto metóda bude popísaná v nasledujúcej podkapitole.

Metóda Debevec & Malik

Pri fotení scény, či už analógovým alebo digitálnym fotoaparátom, dochádza k zaznamenávaniu dvojdimenzionálneho pola hodnôt jasu jednotlivých bodov. Zaznamenané hodnoty sú málokedy správne oproti relatívnemu osvetleniu scény. Napríklad, pokiaľ určitý pixel má dvojnásobnú hodnotu oproti pixelu inému, málokedy sa stane, že aj v skutočnosti je tento bod dvojnásobne jasnejší. Je to spôsobené nelineárnym mapovaním, ktoré priradzuje jednotlivým pixelom hodnoty závisiace od osvetlenia. Toto nelineárne mapovanie je neznáme a ťažko zistiteľné, nakoľko pozostáva z viacerých nelineárnych mapovaní používaných pri procese vytvárania fotografie.

Občas nastane moment, kedy je potrebné odfoťiť scénu s vysokým dynamickým rozsahom, no k dispozícii máme snímač, ktorý má dynamický rozsah obmedzený. Riešením je

spravenie sekvencie fotiek s rôznymi expozíciami. Pri ich skladaní do výslednej fotografie však nastáva problém s neznámym nelineárnym mapovaním [5].

Pred algoritmom na samotné skladanie LDR fotografií, je nutné zistiť funkciu odozvy. Algoritmus zistenia funkcie odozvy využíva fyzickú vlastnosť zariadení snímajúcich scénu, zvanú reciprocita.

Reciprocita je závislosť medzi dĺžkou uzávierky a hodnotou clony. Pri použití clony o jednu hodnotu vyššiu dopadne na senzor fotoaparátu rovnaké množstvo svetla, ako keby sa zvýšil čas uzávierky dvojnásobne. Pokiaľ máme nastavenú určitú expozíciu a dôjde k zvýšeniu času uzávierky na dvojnásobok, znížením hodnoty clony dôjde k zisku rovnakej expozície, ale za nastavenia rôznych hodnôt clony a uzávierky [26].

Zistenie funkcie odozvy

Expozícia X je určená ako súčin hŕdnôt osvetlenia E a doby uzávierky Δt . Vzniká vzťah 2.2 [5].

$$X = E \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

Pre každý pixel je následne namapovaná hodnota Z . Táto hodnota je pixelu pridelená nelineárnou neznámou funkciou, ktorá je označená ako f , vzniká následne vzťah 2.3 [5].

$$Z = f(X) \quad (2.3)$$

Po získaní funkcie f je možné dopočítat hodnotu expozície X pre jednotlivé pixely ako 2.4. Predpokladá sa, že funkcia f je monotónne rastúca a preto má definovanú inverznú funkciu f^{-1} [5].

$$X = f^{-1}(Z) \quad (2.4)$$

So známou hodnotou expozície X a dĺžkou uzávierky Δt je možné získanie hodnoty osvetlenia E [5].

$$E = \frac{X}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Vstupom samotného algoritmu je potom určitý počet fotografií rovnakej scény, s rôznou ale známou dĺžkou expozície Δt_j kde j je poradové číslo snímky. Predpokladá sa statická scéna s celkovým procesom zaznamenávania snímkov dostatočne rýchlym, že svetelné podmienky scény sa nestihnú zmeniť. Je možné usúdiť, že hodnoty osvetlenia E_i sú pre každý pixel i rovnaké.

Hodnota pixelu bude reprezentovaná ako Z_{ij} , kde i je priestorový index pixelu a j indexuje rôzne dĺžky použitých časov uzávierok Δt_j [5]. Následne môžeme byť rovnica reciprocity zapísaná ako 2.6.

$$Z_{ij} = f(E_i \cdot \Delta t_j) \quad (2.6)$$

Z usúdku, že funkcia f je monotónna [5], je možné vyvodiť funkciu f^{-1} ako:

$$f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \cdot \Delta t_j \quad (2.7)$$

Zlogaritmovaním oboch strán rovnice prirodzeným logaritmom vzniká z rovnice 2.7 rovnica 2.8:

$$\ln f^{-1}(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (2.8)$$

Na zjednodušenie zápisu môžeme definovať funkciu $g = \ln f^{-1}$. Dosadením do rovnice 2.8 vznikne rovnica 2.9

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j \quad (2.9)$$

V rovnici 2.9 i indexuje nad pixelmi a j indexuje nad použitými dĺžkami uzávierok. Z_{ij} aj Δt_j sú známe. Neznámymi sú hodnota osvetlenia E_i a funkcia g , o ktorej sa vie, že je monotónna a hladká [5].

Obnovením funkcie g však dostaneme konečnú množinu hodnôt $g(z)$, nakoľko definičný obor funkcie g , hodnoty jasú jednotlivých pixelov, je konečný. Nech Z_{min} je najmenšia hodnota, ktorú pixle nadobúdajú a Z_{max} je hodnota najvyššia, N je počet pozícií umiestnenia pixelov a P je počet spravených fotografií [5].

Následne sa hľadajú $(Z_{max} - Z_{min} + 1)$ hodnoty z $g(Z)$ a N hodnôt z $\ln E_i$, ktoré minimalizujú funkciu 2.10:

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2 \quad (2.10)$$

Prvá časť vzťahu 2.10 je odvodená z predošlých rovníc. Druhá časť vzťahu slúži na zaručenie hladkosti funkcie g podľa vzťahu 2.11 [5].

$$g''(z) = g(z-1) - 2g(z) + g(z+1) \quad (2.11)$$

Skalárna hodnota λ je váha hladkosti, ktorá by mala byť vyberaná s ohľadom na očakávaný šum v meraniach hodnôt Z_{ij} [5].

Algoritmus sa dá vylepšiť predpovedaním tvaru funkcie odozvy. Nakoľko $g(z)$ má typicky strmý sklon okolo Z_{min} a Z_{max} , môže sa očakávať, že $g(z)$ bude menej jemná a nebude úplne odpovedať dátam okolo extrémov. Preto sa zavádza váhová funkcia $w(z)$ (rovnica 2.2), ktorá zdôrazní jemnosť v strede krivky funkcie odozvy, teda dá vyššiu váhu tým bodom, ktoré boli exponované korektne [5].

$$w(z) = \begin{cases} z - Z_{min} & \text{pre } z \leq \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \\ Z_{max} - z & \text{pre } z > \frac{1}{2}(Z_{min} + Z_{max}) \end{cases}$$

Dosadením rovnice 2.2 do vzťahu 2.10 dostaneme:

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P \{w(Z_{ij})[g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]\}^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} [w(z).g''(z)]^2 \quad (2.12)$$

Pre finálny výpočet nie sú potrebné všetky pixely. Pokiaľ bolo nameraných N pixelov v P fotografiách, pre dostatočnú kvalitu výpočtu je nutné zaistiť aby platil nasledovný vzťah pre počet pixelov [5]

$$N(P-1) > (Z_{max} - Z_{min}) \quad (2.13)$$

Týmto krokom končí algoritmus zistenia funkcie odozvy daného fotoaparátu a môžeme prechádzať sa na tvorenie jasovej mapy.

Tvorba mapy jasu

Nakoľko funkcia odozvy je už známa, konvertovanie hodnoty pixelov na relatívne jasové hodnoty je už triviálne, vychádzajúc z faktu, že dĺžky uzávierok Δt_j sú známe. Tým vzniká vzťah odvodený z rovnice 2.9:

$$\ln E_i = g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j \quad (2.14)$$

Výsledná hodnota jasu daného pixelu sa vypočíta pomocou všetkých fotiek danej scény s rôznymi expozíciami. Na tento výpočet sa znovu použije váhová funkcia zo vzorca 2.2. Vyššia váha bude následne pridaná fotkám s takou expozíciou, kde hodnota pixelu, pre ktorý je rátaná hodnota jasu, je bližšie stredu funkcie odozvy [5]. Následne vzniká rovnica:

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^P w(Z_{ij})} \quad (2.15)$$

Takáto mapa jasu ale nie je prisôsobená zobrazeniu na konvenčné displeje zariadení a je nutné ju upraviť tónovým mapovaním. Táto technika bude popísaná v nasledujúcej kapitole.

2.3 Zobrazenie HDR snímkov

Po vytvorení HDR snímku pomocou kombinácie sekvencie snímkov s rôznymi expozíciami, vzniká problém ako takýto snímok zobraziť. Tak ako je nekonvečná tvorba takéhoto HDR snímku, je nekonvenčné aj jeho zobrazovanie. Bežne dostupné displeje niesú schopné zobraziť taký rozsah jasu a kontrastu, aký nesie HDR snímok. Jedným z riešení tohto problému môže byť použitie displeja s technológiou umožňujúcou zobrazenie HDR snímkov, teda hardwarové riešenie. Druhým riešením je softwarová úprava snímku do takej podoby, aby bolo možné tento snímok zobraziť na konvenčnom displeji.

Oba riešenia budú prezentované v nasledujúcich podkapitolách.

Priame zobrazenie HDR

Dynamický rozsah bežných displejov je nedostačujúci na zobrazenie scény na snímku v takej dychberúcej podobe, ako ju videlo ľudské oko. Jednoduché zvýšenie jasu nestačí, nakoľko tmavé tóny by sa zmenili na sivé, no detaily by stále chýbali. Čo je potreba, je značné zvýšenie kontrastu alebo dynamického rozsahu displeja. Jednou možnosťou, ako toto docieľiť je použitie LCD¹⁰ panelu ako optického filtru s programovateľnou priehľadnosťou na modulovanie vysokej intenzity žiarivosti ale nízkeho rozlíšenia z druhého displeja. Pokiaľ dôjde k použitiu LCD displeja s kontrastom $c_1 : 1$ a pred tento panel by sa vložil LCD panel s kontrastom $c_2 : 1$ tak teoreticky je možné získať kontrast $(c_1 \cdot c_2) : 1$. Nakoľko v praxi je priehľadnosť LCD panelu len 3-8%, je nutné veľmi intenzívne vyžarovanie prvého displeja [21].

V reálnej implementácii sa teda použil namiesto zadného LCD panelu ultra žiarivý panel založený na technológii LED¹¹. Výhodou LED panelu je, že každá LED dioda môže mať samostatne nastaviteľnú transparentnosť. Vrstva LED nachádzajúca sa za LCD panelom

¹⁰Skratka z anglického Liquid Crystal Display

¹¹Z anglického Light Emitting Diode

má úlohu vykreslovania osvetlenia daného HDR snímku v nižšom rozlíšení pričom úlohou vrstvy LCD je zobrazovanie daného snímku spolu s farbami vo vysokom rozlíšení [21].

Takýmto riešením sa HDR snímok dokáže vyzobrať na displej so zachovaním HDR vlastností ako vysokého kontrastu a vierohodnosti zobrazenia. Predpokladom na túto realizáciu je však špecializovaný hardware, ktorý nie je úplne bežne dostupný.

Tone mapping

Nakoľko displeje s podporou HDR sú v súčasnosti ešte málo rozšírené, je nutné nájsť riešenie, ako zobraziť HDR snímky na médiách nepodporujúcich HDR, ako napríklad LDR displeje, fotky alebo papier. Aby mohlo dôjsť k zobrazeniu HDR snímku na LDR displeji, je nutné znížiť tónový rozsah na taký, ktorý podporuje cieľové LDR médium. Hlavná úloha tone mappingu, slovensky tónového mapovania, je reprodukovanie vzhľadu snímok s vysokým dynamickým rozsahom tak, aby tieto snímky mohli byť zobrazené na LDR médiách a stále sa približovali čo najviac skutočnosti, teda pôsobili, že majú vysoký dynamický rozsah [11]. Proces tónového mapovania je vykonávaný tónovo mapovacím operátorom.

Tónové mapovanie spočíva v 2 rôznych prístupoch: použitie globálneho operátora alebo použitie lokálneho operátora.

Globálne operátory

Globálne operátory mapujú každý pixel podľa jeho jasnosti a globálnych vlastností obrázku. Na každý pixel je teda aplikovaná rovnaká transformácia, nezávislá na tom, či sa daný pixel nachádza vo svetlej alebo tmavej časti obrázku. Výhodou globálnych operátorov je ich jednoduchosť a rýchlosť. Naopak, ich nevýhodou je strata detailov. Použitím globálneho operátora na tónové mapovanie častokrát vzniká plochý, nekонтрастný obrázok [17].

Lokálne operátory

Lokálne operátory používajú rôzne merítka transformácie na rôzne časti mapovaného obrázku. Pre transformáciu daného pixelu sa berie napríklad v úvahu, či sa daný pixel nachádza vo svetlej alebo tmavej časti snímky. Lokálny operátor umožňuje mapovať výslednú hodnotu pixelu v závislosti na okolí, v ktorom sa pixel nachádza. Logicky z toho plynie, že pri kalkulovaní hodnoty pixelu, je nutné, aby proces prehľadal aj okolie daného pixelu. To robí lokálne operátory oproti globálnym pomalšími a náročnejšími na výpočet. Výsledkom je však snímka, ktorá je bohatá na detaily a oveľa podobnejšia realite [17].

Existujúce operátory

V tejto časti práce budú opísané existujúce a najčastejšie používané operátory tónového mapovania.

Reinhardov operátor

Jedná sa o globálny operátor, u ktorého je potrebné na začiatku mapovanie spočítať hodnotu, ktorá bude reprezentovať celkovú svetlosť scény. Táto hodnota sa tiež nazýva kľúčom. Vzťah na jej výpočet je nasledujúci:

$$\bar{L}_w = \frac{1}{N} \exp \left(\sum_{x,y} \log(\delta + L_w(x,y)) \right) \quad (2.16)$$

V rovnici 2.16 je $L_w(x, y)$ je svetlosť pre pixel (x, y) , N je počet pixelov snímky a δ slúži na korekciu sigularity.

$$L(x, y) = \frac{a}{\bar{L}_w} \bar{L}_w(x, y) \quad (2.17)$$

Rovnica 2.17 slúži na korekciu svetlosti scény. Hodnota a je volená v rozsahu 0.09 až 0.72. Problém rovnice 2.17 je ale ten, že veľká časť scén má dobrý dynamický rozsah, ale obsahujú malý počet regiónov, ktoré majú príliš vysokú svetelnosť alebo sú príliš tmavé. Riešením je použitie rovnice 2.18, kde pixle s vysokou svetelnosťou sú škálované podľa vzťahu $1/L$ zatiaľ čo body s nízkou svetelnosťou ostanú nezmenené. Vzťah 2.18 teda zaisťuje, že regióny s vysokou aj nízkou svetelnosťou budú prevedené na zobraziteľný rozsah [19].

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y)}{1 + L(x, y)} \quad (2.18)$$

Predošlé riešenie však nemusí byť vždy žiadúce. Rozšírením rovnice 2.18 vzniká rovnica 2.19, ktorou sa dá kontrolovať mapovanie bodov scény s vysokou svetelnosťou.

$$L_d(x, y) = \frac{L(x, y) \left(1 + \frac{L(x, y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L(x, y)} \quad (2.19)$$

Kde L_{white} je najnižšia svetelnosť, ktorá už bude mapovaná na čistú bielu. Pokiaľ by L_{white} bola nastavená na najvyššiu vyskytujúcu sa svetelnosť, nedochádzalo by nikde k prepalovaniu svetlých regiónov scény.

Pre mnohé HDR snímky je použitie tejto metódy dostatočné. Ak má snímka až príliš veľký dynamický rozsah, použitím tejto metódy môže dôjsť ku strate niekoľkých detailov. Pre takéto obrázky sa preto odporúča použitie lokálnych operátorov [19].

Adaptívny logaritmický operátor

Adaptívny logaritmický operátor je rýchly a vysoko kvalitný operátor na tónové mapovanie. Vytvorili ho F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen a N. Chiba vo svojej práci [7].

Tento algoritmus tónového mapovania je založený na logaritmickej kompresii hodnôt svetelnosti, napodobňujúcej spôsob, akým človek vníma svetlo. Základom algoritmu je adaptívne nastavenie základu logaritmu podľa radiancie každého pixelu. Dochádza k interpolácii hodnôt svietivosti nachádzajúcich sa v scéne od $\log_2(L_w)$ po $\log_{10}(L_w)$. Kde L_w je svietivosť reálneho sveta. Vďaka tomuto majú tmavé a jemne tmavé oblasti dobrý kontrast a zachované detaily, zatiaľ čo je umožnená maximálna kompresia najsvetlejších oblastí [7].

Funkcia vykonávajúca tento algoritmus je vyzobrazená v rovnici 2.20.

$$L_d = \frac{L_{dmax} \cdot 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 11)} \cdot \frac{\log(L_w + 1)}{\log \left(2 + \left(\left(\frac{L_w}{L_{wmax}} \right)^{\frac{\log(b)}{\log(0.5)}} \right) \cdot 8 \right)} \quad (2.20)$$

L_d predstavuje zobrazujúcu hodnotu pixelu. Táto rovnica potrebuje hodnoty L_w a L_{wmax} , ktoré popisujú danú scénu a L_{dmax} , ktorý predstavuje najvyššiu hodnotu svietivosti, ktorú dokáže displej zobrazit [7].

Hodnotu b je vhodné voliť v rozpätí 0.7 až 0.9. Z experimentovania vyplynulo, že najvhodnejšou hodnotou je 0.85. Experimentovanie bolo prevedené na piatich osobách, ktorým boli ukázané rovnaké fotky za použitia rôznej hodnoty b . Za najrealistickejšie označili práve fotky s použitou hodnotou $b = 0.85$ [7].

Adaptívny lokálny operátor založený na teórii Retinex

Jedná sa o lokálny operátor založený na teórii Retinexu. Táto teória, navrhnutá Edwinom Landom, popisuje farby, jas a nemennosti vnímania jas. Nemennosťou sa rozumie efekt vnímania objektov, kde človek vníma ich jas takmer konštatne, aj keď dochádza k zmene celkového svetla, ktoré tieto objekty odrážajú. V rámci tejto teórie bolo zistené, že výsledná farba nekoreluje s odozvou zrakových receptorov. Ale že vzhľad reálnych scén je určený obsahom týchto scén a reakciou čapíkov na trojicu dlhého, stredného a krátkeho elektromagnetického vlnenia sa môže zobraziť ľubovoľná farba. Meno teórie Retinex odzrkadľuje fakt, že vnímanie obrazu je výsledkom práce sietnice¹² a mozgovej kôry¹³ a bolo vytvorené ako kombinácia anglických pomenovaní týchto častí ľudského tela [16].

Samotný algoritmus pozostáva z 2 krokov: predspracovania vo forme globálneho operátora a následnej aplikácii lokálneho operátora, založeného na princípe teórie Retinexu [1]. Predspracovanie globálnym operátorom sa taktiež nazýva globálnou adaptáciou algoritmu a aplikácia lokálneho operátora lokálnou adaptáciou algoritmu.

Výstup globálnej adaptácie $L_g(x, y)$ je získaný podľa vzťahu z rovnice 2.21.

$$L_g(x, y) = \frac{\log\left(\frac{L_w(x, y)}{\bar{L}_w} + 1\right)}{\log\left(\frac{L_{wmax}}{\bar{L}_w} + 1\right)}, \quad (2.21)$$

kde $L_w(x, y)$ je vstupná svietivosť snímanej scény, L_{wmax} je maximálna hodnota svietivosti danej scény a \bar{L}_w je logaritmický priemer svietivosti scény určený rovnicou 2.22.

$$\bar{L}_w = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{x, y} \log(\delta + L_w(x, y))\right), \quad (2.22)$$

kde N je počet pixelov v obrázku a δ je malá hodnota, slúžiaca na zamedzenie singularity, ktorá vzniká pri čiernych pixeloch v obrázku.

V druhom kroku algoritmu, je na výstup globálnej adaptácie $L_g(x, y)$ aplikovaný lokálny operátor, založený na teórii Retinex. Použitím filtru zachovávajúceho hrany je možné zníženie vzniku artefaktov v okolí hrán, takzvaných “halo” artefaktov. Tento operátor používa namiesto Gaussovského filtru takzvaný guided filter.

Jedná sa o filter, ktorý zachováva hrany, podobne ako bilaterálny filter, no líši sa v tom, že jeho váhy nezáležia len na Euklidických vzdialenostiach ale aj na hodnotách svietivosti jednotlivých pixelov [12].

Rovnica na lokálnu adaptáciu je nasledovná:

$$L_l(x, y) = \log L_g(x, y) - \log H_g(x, y), \quad (2.23)$$

kde $L_l(x, y)$ predstavuje výstup lokálnej adaptácie a $H_g(x, y)$ je výstupom aplikácie guided filtra, použitého na výstup globálnej adaptácie $L_g(x, y)$. Rovnica aplikácie guided filtra na výstup globálnej adaptácie je zobrazená v rovnici 2.24.

$$H_g(x, y) = \frac{1}{|\omega|} \sum_{(\xi_x, \xi_y) \in \omega(x, y)} (a(\xi_x, \xi_y) L_g(x, y) + b(\xi_x, \xi_y)) \quad (2.24)$$

V rovnici 2.24 predstavujú ξ_x, ξ_y súradnice susedných pixelov, $\omega(x, y)$ je okno s polomerom r a počtom obsahujúcich pixelov $|\omega|$, ktoré je centrované na pixel (x, y) .

¹²Anglicky retina

¹³Anglicky cortex

$a(\xi_x, \xi_y)$ a $b(\xi_x, \xi_y)$ sú lineárne koeficienty určené ako:

$$a(\xi_x, \xi_y) = \frac{\mu_2(\xi_x, \xi_y) - \mu^2(\xi_x, \xi_y)}{\sigma^2(\xi_x, \xi_y) + \epsilon} \quad (2.25)$$

$$b(\xi_x, \xi_y) = \mu(\xi_x, \xi_y) - a(\xi_x, \xi_y)\mu(\xi_x, \xi_y), \quad (2.26)$$

kde v rovniciach 2.25 a 2.26 je $\mu(\xi_x, \xi_y)$ priemer a $\sigma^2(\xi_x, \xi_y)$ je odchýlka L_g v okne $\omega(\xi_x, \xi_y)$. $\mu_2(\xi_x, \xi_y)$ predstavuje priemer L_g^2 v okne $\omega(\xi_x, \xi_y)$ a ϵ je regulačný parameter.

Po aplikovaní filtra sú “halo” artefakty značne redukované, ale celkový výsledok je vzhľadom na svoj nízky kontrast stále neuspokojivý. To viedlo k vzniku metódy, ktorá slúži na úpravu celkového kontrastu, jej vzťah je vyjadrený v rovnici 2.27.

$$\alpha(x, y) = 1 + \eta \frac{L_g(x, y)}{L_{gmax}}, \quad (2.27)$$

kde η je paramter slúžiaci na kontrolu kontrastu a L_{gmax} je maximálna hodnota svietivosti výstupu globálnej adaptácie.

Druhá metóda na vylepšenie celkového vzhľadu výslednej snímky je označovaná ako β . Slúži ako odchýlka pri ovládaní nelinearity logaritmickkej funkcie a jej vzťah je určený vzorcom 2.28.

$$\beta = \lambda \bar{L}_g, \quad (2.28)$$

kde λ je parameter na ovládanie nelinearity a \bar{L}_g je logaritmický priemer hodnôt svietivosti výstupu globálnej adaptácie určený podľa vzorca 2.22.

Integrovaním 2.27 a 2.28 do 2.23 vzniká vzťah 2.29, ktorého výsledkom je konečný HDR snímok po tónovom mapovaní [1].

$$L_{out}(x, y) = \alpha(x, y) \log \left(\frac{L_g(x, y)}{H_g(x, y)} + \beta \right) \quad (2.29)$$

Kapitola 3

Návrh a špecifikácia zadania

V predchádzajúcej kapitole bola popísaná a vysvetlená problematika vytvárania a zobrazovania HDR snímok hlavne z teoretického hľadiska. Na základe týchto poznatkov bude v tejto kapitole popísaný návrh, s dôrazom na uvedenie použitých technológií a popisu štruktúry programu, a v nasledujúcich kapitolách postup implementácie výslednej aplikácie, ktorá je cieľom tejto práce. Po úspešnej implementácii aplikácie budú v poslednej kapitole prezentované dosiahnuté výsledky vo forme samotných fotografií, ktoré sú výstupom aplikácie, a vo forme hodnôt získaných meraním časovej náročnosti aplikácie pri jednotlivých konfiguráciách.

3.1 Návrh činnosti aplikácie

Na akvizíciu HDR snímku s LDR snímačom je nutné, aby došlo k zachyteniu aspoň 3 snímok s rôznou expozíciou. Výsledná aplikácia bude umožňovať užívateľovi špecifikovať počet snímok, z ktorých bude výsledný HDR snímok zložený. Čím viac snímok užívateľ špecifikuje, tým širší dynamický rozsah bude môcť byť zachytený, čo vo výsledku vyprodukuje kvalitnejší výsledný snímok. Jednotlivé snímky budú po zachytení uložené do pola, v ktorom budú zoradené vzostupne podľa svojich expozičných časov. Užívateľ bude môcť v nastaveniach zvoliť možnosť, kedy po zachytení LDR snímok dôjde k ich okamžitej kompresii a uloženiu do formátu JPG. Pokiaľ užívateľ bude mať k dispozícii málo pamäťového priestoru na uloženie LDR snímok, dôjde na konci behu výpočetného cyklu k uloženiu len jednej snímky - výslednej HDR snímke.

Po zachytení snímok bude nutné ich spojenie. Na pole LDR snímok sa použije algoritmus od autorov Debevec a Malik, ktorého výstupom bude získanie funkcie odzvy procesu snímmania LDR fotografií s pomocou predpokladu reciprocity. So známou funkciou odzvy sa druhým algoritmom, od rovnakých autorov, spoja viaceré fotografie do jednej HDR snímky, v ktorej hodnoty jednotlivých pixelov budú odpovedať žiarivosti bodov reálnej scény. Treba však brať v úvahu, že čím viac fotografií bude pole LDR snímok obsahovať, tým dlhší bude výpočetný čas algoritmov spojenia. Aj za týmto účelom si užívateľ bude môcť zvoliť počet fotografií, z ktorých bude chcieť výsledný HDR snímok zložiť.

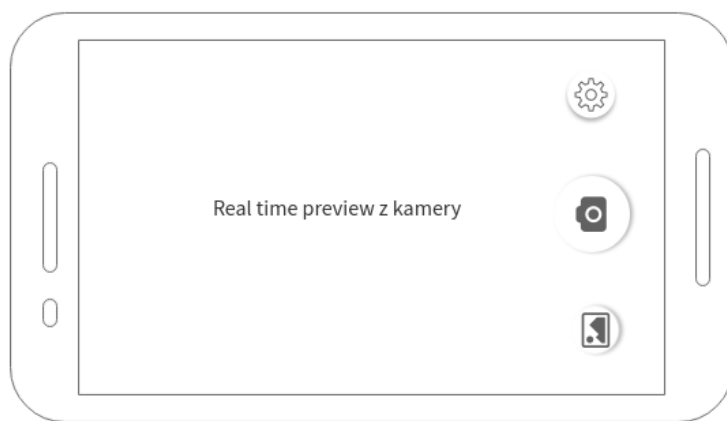
Na to aby bolo možné zobrazit vytvorený HDR snímok na displeji mobilného zariadenia, bude nutné na neho aplikovať operátor tonového mapovania. Tým sa umožní jeho zobrazenie na LDR displej, pričom dôjde k zachovaniu HDR vlastností snímku. Aplikácia užívateľovi ponúkne na výber viaceré operátory. Vzhľadom na potrebu rýchleho spracovania požiadavku bude väčšina operátorov globálnych, napríklad operátory od autorov Draga

alebo Reinharda. Na porovnanie bude na výber aj lokálny operátor založený na teórii Retinexu. Bude možné teda porovnať dobu spracovania medzi globálnym a lokálnym operátorom a takisto aj výsledok aplikácie daného operátora.

3.2 Návrh grafického užívateľského rozhranie

Grafické užívateľské rozhranie (skrátene GUI) by sa malo zakladať na jednoduchosti použitia, teda by malo byť čo najintuitívnejšie. Kľúčové bude použitie Material Design ikón, ktoré užívateľovi prezradia funkcie jednotlivých tlačítok bez nutnosti zdĺhavého popisu. Samotné GUI sa bude skladať z 2 rôznych aktivít, jednej hlavnej, v ktorej bude užívateľ vidieť preview z fotoaparátu, a druhej aktivity nastavení, ktorá bude slúžiť na konfiguráciu snímania.

Návrh hlavnej aktivity je zobrazený na obrázku 3.1. Celá aktivita bude pozostávať z troch tlačidiel. Hlavného tlačidla snímania umiestneného v strede, aby bolo ovládanie čo najintuitívnejšie, a dvoch pomocných tlačidiel - tlačidla galérie a tlačidla nastavení. Stlačením hlavného tlačidla dôjde k začiatku snímania sekvencie fotografií. Stlačením tlačidla galérie bude môcť užívateľ prejsť do vstavanej galérie operačného systému Android, v ktorej bude mať k dispozícii všetky svoje fotografie.



Obr. 3.1: Hlavná aktivita aplikácie

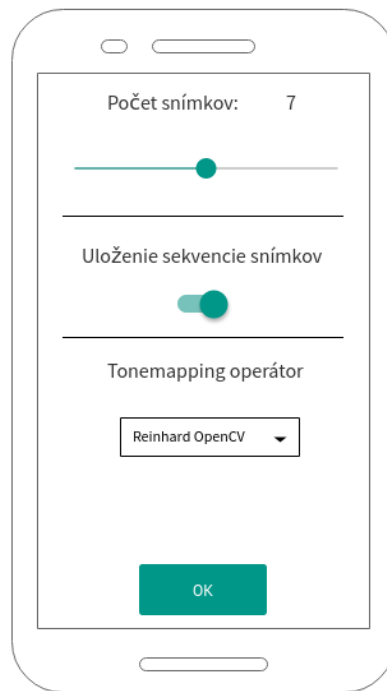
Stlačením tlačidla nastavení, dôjde k otvoreniu druhej aktivity, v ktorej bude môcť užívateľ konfigurovať nastavenia snímania. Táto aktivita je zobrazená na obrázku 3.2

V aktivite nastavení bude mať užívateľ k dispozícii všetky nastavenia, ktoré aplikácia podporuje. Jednoduchou interakciou bude užívateľ môcť zmeniť počet fotiek, typ operátora alebo potvrdiť uloženie samotnej sekvencie LDR fotiek.

3.3 Použité technológie

Zoznam použitých technológií:

- Android Studio - vývojové prostredie pre tvorbu aplikácií na platformu Android, umožňujúce prehľadný vývin aplikácie, jednoduché debugovanie a vyznačovanie syntaktických a aj niektorých semantických chýb ešte pred prekladom. Pri implementácii aplikácie sa pracovalo s verziou Android Studio 3.0.1.



Obr. 3.2: Aktivita nastavení

- Java - objektovo orientovaný programovací jazyk, používaný k tvorbe väčšiny aplikácií na platformu Android. Jedná sa oficiálny programovací jazyk pre platformu Android. Pre Javu existuje najviac knižníc a API uľahčujúcich prácu s daným Android zariadením.
- XML - značkový jazyk používaný v Androide na tvorbu grafického užívateľského rozhrania. Každý grafický prvok, ktorý má byť zobrazený v jednotlivých aktivitách musí byť špecifikovaný v náležiacom XML súbore.
- OpenCV 3.4.0 - jedná sa o rozsiahlu knižnicu uľahčujúcu manipulovanie so snímkami a grafickým obsahom celkovo. Aj napriek tomu, že táto knižnica je napísaná v jazyku C++, je možné ju importovať do Android Studio v podobe SDK¹ a v tejto podobe ju využívať na vývoj aplikácie v jazyku Java. Výhodou použitia metód tejto knižnice je ich natívne vykonávanie.
- Camera2 API - je API² umožňujúce prístup k hardwarovým kamerám na konkrétnom Android zariadení. Camera2 nahradila pôvodné Camera API s príchodom Androidu s API levelom 21. Vzhľadom na túto skutočnosť je aplikáciu možné spustiť len na zariadeniach s Androidom 5.0 Lollipop a novším [3].
- Vývoj aplikácie počas celej doby prebiehal na počítači s operačným systémom Windows 10.

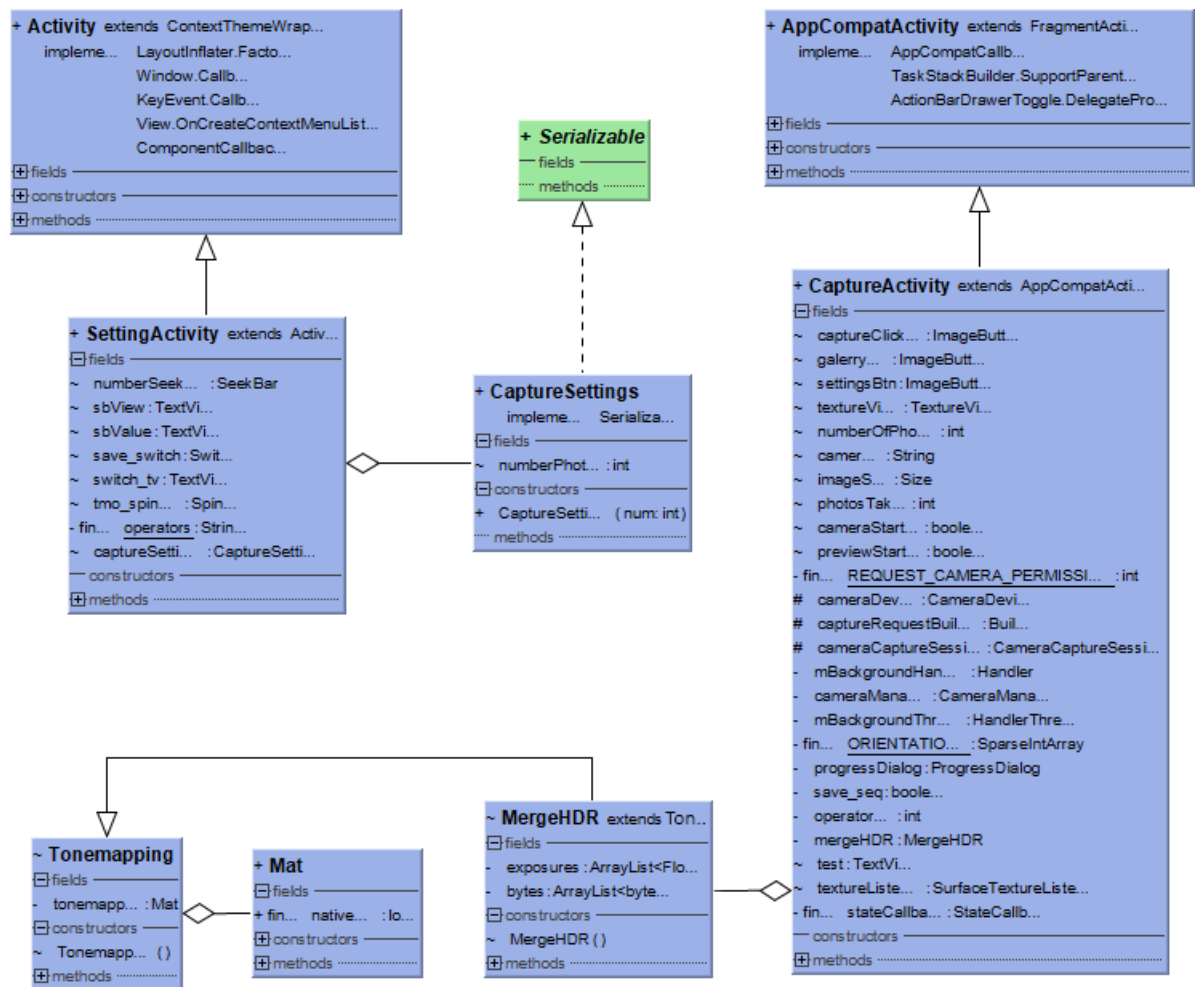
¹Software Development Kit

²Skratka z anglického Application Programming Interface. V slovenčine: rozhranie pre programovanie aplikácie.

- Testovanie aplikácie prebiehalo na mobilnom telefóne Sony, model Xperia X Compact, s operačným systémom Android 7.0 Nougat (API level 24).

3.4 Návrh triedneho modelu aplikácie

Na obrázku 3.3 je zobrazený UML diagram návrhu triednych závislostí, zobrazujúcich vzťahy medzi jednotlivými triedami a ich dedičnosť. Samotné triedy budú detailne popísané v nasledujúcej kapitole 4.



Obr. 3.3: UML schéma triednych závislostí

Kapitola 4

Implementácia

Cieľom tejto kapitoly bude popis implementácie výslednej aplikácie a podrobný popis implementovaných tried. Implementácia bola vykonávaná s ohľadom na získané teoretické znalosti popísané v kapitole 2 a pripravený návrh v kapitole 3. Úlohou implementovanej aplikácie je pomocou konvenčného mobilného zariadenia vyprodukovať snímku s vysokým dynamickým rozsahom. V tejto kapitole bude popísané, ako autor práce postupoval pri implementácii aplikácie.

4.1 Triedny model aplikácie

Nakoľko na vývin aplikácie bol použitý objektovo orientovaný jazyk, úlohou tejto kapitoly bude vysvetlenie a popísanie jednotlivých tried použitých na vytvorenie cieľovej aplikácie. Implementovaný triedny model odpovedá svojmu návrhu, zobrazenému na obrázku 3.3.

Trieda CaptureActivity

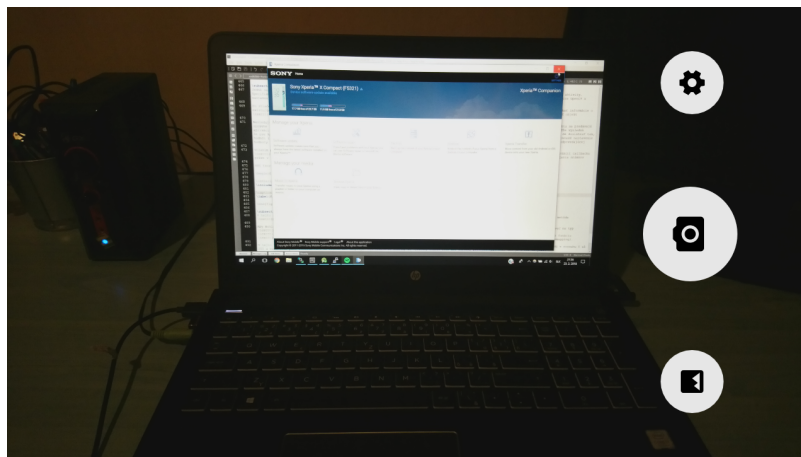
Jedná sa o hlavnú triedu vytvárajúcu hlavnú aktivitu. Pri spustení aplikácie dochádza k vykonaniu kódu, ktorý je špecifikovaný práve v triede tejto aktivity. Pri každom spustení dôjde k nastaveniu listenerov na tlačítka nachádzajúce sa na GUI patriacom tejto aktivite. Rovnako dochádza k inicializácii knižnice OpenCV a nastaveniu `TextureView`, na ktorom bude zobrazovaný preview z kamery.

Hlavnou úlohou tejto triedy je zachytenie snímkov a ich predanie do tried, kde budú spracované. Presnejšie bude tento postup opísaný v nasledujúcej časti. V tejto triede dochádza k ukladaniu zaznamenaných LDR snímkov. Rovnako sa tu nastavujú aj časy uzávierok jednotlivých fotografií. Tieto časy sú optimalizované na mobilný telefón, na ktorom prebiehalo testovanie počas vývoja. Pri užívateľovej voľbe 11 fotografií budú použité nasledujúce časy uzávierok: $\frac{1}{10}$ s, $\frac{1}{16}$ s, $\frac{1}{32}$ s, $\frac{1}{64}$ s, $\frac{1}{128}$ s, $\frac{1}{256}$ s, $\frac{1}{512}$ s, $\frac{1}{1024}$ s, $\frac{1}{2048}$ s, $\frac{1}{4096}$ s, $\frac{1}{8192}$ s. Pokiaľ užívateľ vyberie fotografií menej, dôjde k odoberaniu krajných hodnôt.

GUI tvoriace front-end aktivity implementovanej touto triedou je zobrazený na obrázku 4.1. XML kód vytvárajúci toto GUI je špecifikovaný v súbore `activity_capture.xml`.

Po stlačení tlačidla galérie, na obrázku 4.1 vľavo dole, dôjde k otvoreniu systémovej galérie, kde si užívateľ bude môcť zobrazíť zachytené fotografie.

Stlačením tlačidla nastavení, na obrázku 4.1 vpravo dole, dôjde k spusteniu aktivity nastavení. Trieda implementujúca túto aktivitu bude opísaná v ďalšej časti tejto kapitoly.



Obr. 4.1: Grafické užívateľské rozhranie triedy `CaptureActivity`

Trieda `MergeHDR`

V tejto triede dochádza ku skladaniu zachytenej sekvencie snímok a vytvoreniu výsledného HDR snímku. Hlavnou metódou, v ktorej dochádza ku spojeniu fotografií je metóda `makeHDR(...)`. Táto metóda je volaná z triedy `CaptureActivity` a ako argumenty sa predávajú informácie o použitých časoch uzávierok.

Aby mohlo skladanie prebehnúť bez problémov, je nutné upraviť vstupy na požadovaný formát. Všetky snímky aj informácie o časoch uzávierok je preto nutné konvertovať na typ `Mat`. Jedná sa o formát knižnice `OpenCV`, ktorý implementuje n-dimenzionálne husté pole. Práve nad týmto formátom ponúka knižnica všetky svoje pokročilé funkcie. S dátami v potrebnom formáte je funkciou `createCalibrateDebevec(...)` získaná funkcia odozvy, s pomocou ktorej, dôjde k spojeniu sekvencie fotiek algoritmom, od autorov Debeveca a Malika. Spojenú fotku je nutné upraviť, aby bola zobraziteľná na LDR displej zariadenia. Túto úlohu plnia metódy triedy `Tonemapping`.

V tejto triede však ešte dochádza k normalizácii a konvertovaniu už tonemapovanej snímky. Normalizácia zaistí, že všetky hodnoty pre jednotlivé farebné kanály budú v rozsahu 0 až 255 a budú teda plne zobraziteľné na bežnom LDR displeji. Konverziou sa zaistí, že výsledný snímok bude mať farebný priestor typu RGB, ako je u PNG obvyklé.

Trieda `Tonemapping`

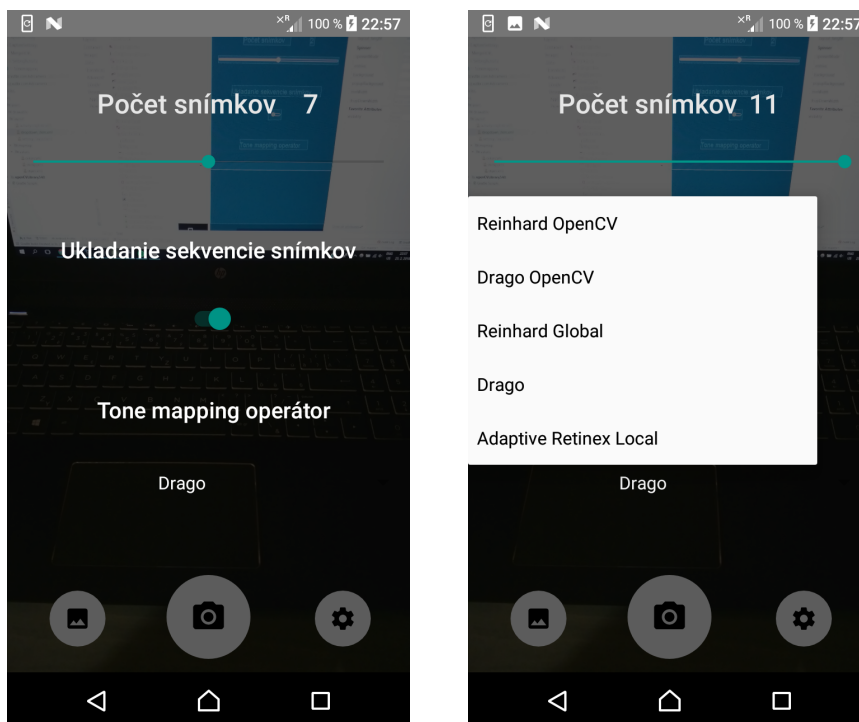
`Tonemapping` je trieda, v ktorej dochádza k vykonaniu tónového mapovania. Funkcie obsiahnuté v tejto triede implementujú jednotlivé operátory tónového mapovania. Okrem týchto funkcií sa tu nachádzajú ešte pomocné funkcie na získanie mapy luminancie a funkcia implementujúca `guided filter`. Funkcie sú volané v závislosti na zvolení konkrétneho operátora užívateľom cez grafické užívateľské rozhranie. Po skončení behu funkcie dôjde k navráteniu tonemapovaného snímku a riadenia sa predá kódu vykonávanému v triede `MergeHDR`.

Trieda `SettingsActivity`

Jedná sa o triedu poskytujúcu back-end pre aktivitu nastavení. Aktivita nastavení bude spustená, pokiaľ dôjde k stlačeniu tlačidla nastavení v hlavnej aktivite programu. Hlavnou úlohou tejto triedy je predanie užívateľom zvolených nastavení do triedy `CaptureActivity`,

v ktorej tieto nastavenia ovplyvňujú proces snímania a spracovávaní fotografií. Aby nedošlo k strate užívateľom nastavených hodnôt, ukladajú sa tieto nastavenia do `SharedPreferences`, kde pretrvávajú do doby odinštalovania aplikácie.

GUI pre aktivitu tejto triedy je zobrazené na obrázku 4.2. Kód, ktorý vytvára grafické rozhranie pre túto aktivitu sa nachádza v súbore `settings_layout.xml`.



Obr. 4.2: Grafické užívateľské rozhranie pre nastavenia. Na ľavo sa nachádza základné rozloženie. Na pravom obrázku je rozloženie pri výbere operátora tónového mapovania.

4.2 Snímanie fotografií

Po stlačení tlačidla spúšte, v GUI patriacemu `CaptureActivity`, sa spustí proces snímania sekvencie fotografií. Proces začína vytvorením objektu `CameraManager`, pomocou ktorého sa dajú získať informácie o existujúcich hardwarových kamerách zariadenia. Každá táto kamera má jednoznačný identifikátor `CameraId`. Následne je podľa `CameraId` možné získať objekt `CameraCharacteristics`, cez ktorý je možné dožiadať všetky potrebné informácie o konkrétnej kamere.

Nasleduje vytvorenie `CameraCaptureSession` objektu, ktorý je v podstate nakonfigurované snímanie kamery a použije sa na zachytenie snímok. Tomuto objektu sa predávajú správne vytvorené a nastavené `CaptureRequest`-y. Sú to nemenné balíky nastavení a výstupov, ktoré sú potrebné pre zachytenie snímok na danej kamere. Keďže výsledná aplikácia bude používať metódu skladania fotografií podľa autorov Debeveca a Malika, je potrebné aby sa fotografie v sekvencii líšili len dĺžkou expozície. To sa dá dosiahnuť tak, že pre každú fotografiu, ktorú má snímanie zachytiť, dôjde k vytvoreniu vlastného `CaptureRequest`-u. Jednotlivé `CaptureRequest`-y budú zdieľať rovnaké nastavenie hodnôt ISO a clony, no budú sa líšiť nastavením dĺžky expozície. Aby sa zabránilo zmene nastavených hodnôt, je nutné použiť manuálny expozičný režim nastavením odpovedajúcej hodnoty v `CaptureRequest`-e.

Volaním metódy `captureBurst(...)` sa začne snímanie sekvencie fotografií s vopred pripravenými vlastnosťami. Po nasnímaní každého snímku dôjde ku invokácii callbacku `onImageAvailable(...)`, kde dôjde podľa voľby užívateľa buďto k uloženiu nasnímaných dát do pamäte zariadenia alebo len predaniu do inštancie triedy `MergeHDR`. Po skončení celého snímania dôjde k započatiu skladania snímkov práve v tejto triede.

4.3 Realizácia tónového mapovania

V tejto časti práce bude popísaný postup, akým prebieha tónové mapovanie HDR snímku, ktorý vznikol spojením sekvencie LDR snímkov. Aplikácia obsahuje implementáciu globálnych operátorov a aj jeden lokálny operátor. Tieto operátory boli z teoretického hľadiska opísané v kapitole 2. V tejto časti bude popis, akým spôsobom tieto algoritmy implementoval autor práce.

Získanie mapy luminancie

Prvým krokom tónového mapovania u všetkým operátorov je získanie mapy luminancie. Jedná sa o prevedenie spojeného HDR snímku do čierno-bielej podoby. Na tento prevod bol použitý vzorec zobrazený v rovnici 4.1.

$$L_w(x, y) = 0.299R(x, y) + 0.587G(x, y) + 0.114B(x, y) \quad (4.1)$$

Rozložením spojeného snímku na jednotlivé farebné zložky a ich váhovaným súčtom dostaneme mapu luminancie. Je to v podstate čiernobiela verzia HDR obrázku, kde svetlosť každého pixelu vyjadruje svetlosť bodu scény v reálnom svete bez závislosti na jeho farbe.

Príklad mapy luminancie je uvedený na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Mapy luminancie scén

Aplikácia globálneho operátora

Na získanú mapu luminancie je následne použitý jeden z vybraných globálnych operátorov popísaných v kapitole 2. Podľa daných vzorcov dôjde ku modifikácii mapy luminancie. Výsledkom tejto činnosti je upravená mapa luminancie. Takto modifikovaná mapa je zobrazená na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Upravené mapy luminancie po použití globálneho operátora

Takto upravená mapa zobrazuje upravenú hodnotu svietivosti bodov. Jednotlivé body budú mať vo výslednej snímke svietivosť odpovedajúcu hodnotám tejto upravenej mapy. Pomer hodnôt upravenej a pôvodnej mapy sa použije pri kolorizácii snímky.

Aplikácia lokálneho operátora

Pokiaľ bol zvolený lokálny operátor tonového mapovania, proces úpravy tonality ešte neskončil a je nutné aplikovať časť algoritmu, ktorá prevedie lokálne mapovanie. Na upravenú mapu luminancie, ktorá je výstupom globálnej adaptácie, sa použije nasledovný postup, inšpirovaný popisom uvedeným v [1].

Najskôr dôjde k obstaraniu dilatovanej verzie, v ktorej dôjde k vyhladeniu celej snímky. Na dilatáciu je použitá OpenCV funkcia `Imgproc.dilate(...)` s vytvoreným kernelom o veľkosti 10 pixelov. Takto dilatovaný výstup je zobrazený na obrázku 4.5.

Dilatovaná verzia snímky je následne filtrovaná guided filtrom podľa pôvodnej, ostrejšej verzie snímky. Nakoľko sa jedná o filter zachovávajúci hrany, dôjde k rozostreniu pôvodnej, ostrejšej, fotky podľa dilatovanej verzie fotky v miestach, kde sa nenachádzajú hrany. Týmto postupom dosiahneme redukciiu, a v lepších prípadoch až elimináciu, “halo” efektov vzniknutých aplikáciou globálneho operátora. Pri aplikácii filtra sú použité nasledovné parametre:



Obr. 4.5: Dilatované mapy luminancie

$$r = 10, \epsilon = 0.01, \quad (4.2)$$

kde r je parameter určujúci rádius okolo určitého pixelu a ϵ je regulačný parameter. Tieto parametre boli volené podľa doporučenia uvedenom v [1]. Výsledok filtrovania guided filtrom je zobrazený na obrázku 4.6.

Takto vzniknutý výsledok je ešte potrebné upraviť podľa popisu v [1]. Dochádza k úprave globálneho kontrastu a vzniknutej nelinearity.

Výsledok týchto úprav je zobrazený na obrázku 4.7.

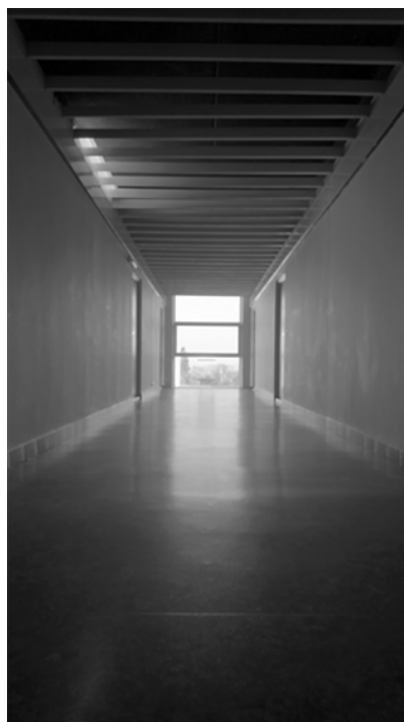
Takto upravený obrázok už stačí len kolorizovať postupom popísaným v nasledujúcej časti.

Získanie farebného výsledku

Nech $L_{tone}(x, y)$ predstavuje snímku po úprave operátorom tónového mapovania a $L_w(x, y)$ predstavuje mapu luminancie danej scény, vzorcom 4.3 dôjde k získaniu dvojdimenzionálneho pola, $change(x, y)$, informácií o zmene hodnôt všetkých bodov scény.

$$change(x, y) = \frac{L_{tone}(x, y)}{L_w(x, y)} \quad (4.3)$$

Nech $M(x, y)$ je HDR snímok vzniknutý spojením sekvencie LDR snímkov, napríklad pomocou algoritmov od autorov Debeveca a Malika, a $R_M(x, y)$ je červený, $G_M(x, y)$ je zelený a $B_M(x, y)$ je modrý kanál snímku $M(x, y)$, rovnicou 4.4 dôjde k úprave farebných kanálov vynásobením mierou zmeny pre všetky body x, y .



Obr. 4.6: Snímky po úprave guided filtrom



Obr. 4.7: Snímky po konci aplikácie lokálneho operátora

$$\begin{aligned}
R_{new}(x, y) &= M(x, y) * R_M(x, y) \\
G_{new}(x, y) &= M(x, y) * G_M(x, y) \\
B_{new}(x, y) &= M(x, y) * B_M(x, y)
\end{aligned}
\tag{4.4}$$

Aplikáciou rovnice 4.4 dôjde k získaniu farebných kanálov snímku upraveného operátorom tónového mapovania. Už je potrebné ich len zrekonštruovať do výslednej snímky a túto snímku znormalizovať na 8 bitovú hĺbku farebného kanála, aby ju bolo možné zobrazíť na LDR displejoch.

Tento process je implementovaný vo funkcii `colorize(...)`. Výsledok procesu je zobrazovaný na obrázku 4.8.



Obr. 4.8: Kolorizované výsledné snímky po upravení operátorom tónového mapovania

Kapitola 5

Testovanie a analýza výsledkov

Obsahom tejto kapitoly bude porovnanie výsledkov získaných z cieľovej aplikácie. Porovnávané budú napríklad časy, potrebné na nasnímanie sekvencie snímkov o rôznej dĺžke, ale aj kvalita výstupného snímku pri použití rôzneho počtu snímiek na jeho vytvorenie a vplyv operátora tónového mapovania na výslednú kvalitu snímky. Aby bola zaistená objektívnosť pri porovnávaní, bude vždy snímaná rovnaká scéna na jednom zariadení. Pri nasledujúcich testoch bol použitý mobilný telefón Sony Xperia X Compact [28]. Všetky snímky zachytené týmto zariadením boli o rozlíšení 3840 na 2160 pixelov, čo je približne 8,3 Mpix.

5.1 Doba snímania a skladania

Tento experiment sa zameriava na zistenie doby potrebnej k zaznamenaniu sekvencie snímkov o rôznej dĺžke a ich nasledovnému spojeniu algoritmom od Debeveca a Malika. Pri experimentovaní bola snímaná rovnaká statická scéna so zariadením umiestneným na statíve. Experimentovanie bolo prevedené bez ukladania jednotlivých LDR snímkov.

V tabulke 5.1 sú zobrazené výsledky experimentu, skúmajúceho dobu potrebnú na nasnímanie s spojenie fotografií bez ukladania celej sekvencie. Jednotlivé hodnoty udané v tabulke boli získané ako aritmetický priemer troch meraní.

Počet fotografií	Doba fotenia [s]	Doba skladania [s]
3	1.678	7.791
5	2.333	10.380
7	3.011	13.143
9	3.679	16.075
11	4.424	19.360

Tabuľka 5.1: Tabuľka zobrazujúca čas potrebný na vykonanie fotenia a skladania pri rôznom počte použitých fotografií

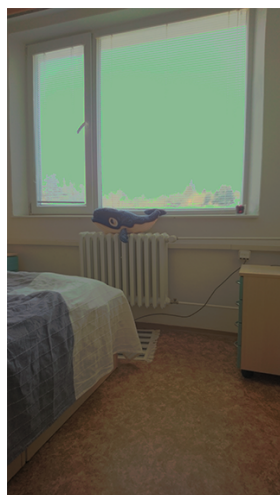
Z tabuľky 5.1 vyplýva, že pokiaľ dôjde k zvýšeniu počtu fotografií, z ktorých sa bude skladať výsledný snímok, tak k zvýšeniu časovej náročnosti dochádza nie tak moc pri snímaní, ale práve pri skladaní týchto fotografií. Zvýšenie počtu fotografií o 2 predĺži snímanie o necelú sekundu, no následné skladanie sa predĺži až o 3 sekundy.

5.2 Vplyv počtu fotografií

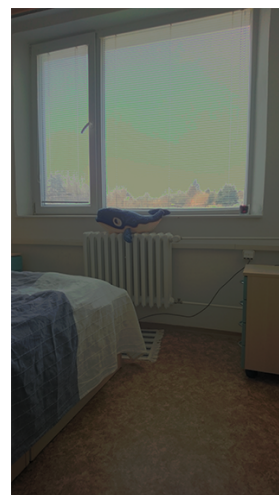
V tomto experimente budú porovnávané HDR fotografie tej istej scény líšiace sa počtom fotografií, ktorými boli vytvorené. Z predchodzieho experimentu jasne vyplynula rastúca časová náročnosť spracovania, pokiaľ došlo k zvýšeniu počtu snímaných snímok. V tomto experimente sa bude zisťovať, či zvyšujúci sa počet fotografií bude mať za následok okrem zvýšenia výpočtového času aj zvýšenie dynamického jasu snímky.



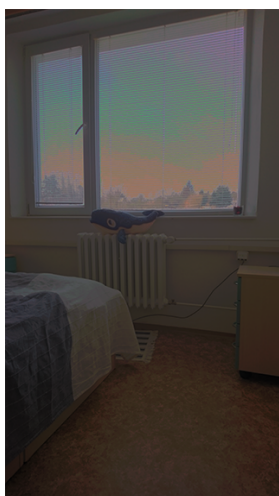
(a) Z 3 fotografií



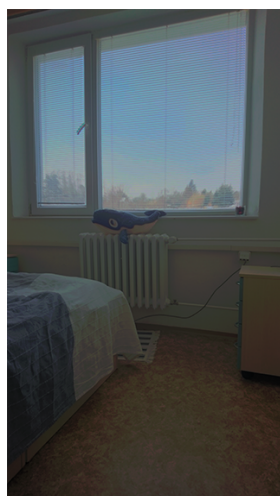
(b) Z 5 fotografií



(c) Z 7 fotografií



(d) Z 9 fotografií



(e) Z 11 fotografií

Obr. 5.1: Výsledné HDR snímky aplikácie. Každá bola vytvorená skladaním z rôzneho počtu LDR snímok. Na tónové mapovanie bol použitý Reinhardov globálny operátor.

Na obrázku 5.1 je zobrazené porovnanie výsledných HDR fotografií aj s počtom LDR fotografií, ktoré boli použité na vyhotovenie výslednej HDR fotografie. Časy uzávierok jednotlivých zdrojových LDR fotografií sú uvedené v tabuľke 5.2.

Už pri pozorovaní týchto výsledkov voľným okom je jasné, že čím viac LDR fotografií s rôznou expozíciou je vyhotovených na konštrukciu HDR fotky, tým kvalitnejší výsledok vznikne. Je to kvôli tomu, že malý počet fotografií nedokáže pokryť celý dynamický rozsah

Výsledný snímok	Časy uzávierok zdrojových snímkov [s]
5.1a	$\frac{1}{256}, \frac{1}{128}, \frac{1}{64}$
5.1b	$\frac{1}{1024}, \frac{1}{512}, \frac{1}{256}, \frac{1}{128}, \frac{1}{64}$
5.1c	$\frac{1}{2048}, \frac{1}{1024}, \frac{1}{512}, \frac{1}{256}, \frac{1}{128}, \frac{1}{64}, \frac{1}{32}$
5.1d	$\frac{1}{4096}, \frac{1}{2048}, \frac{1}{1024}, \frac{1}{512}, \frac{1}{256}, \frac{1}{128}, \frac{1}{64}, \frac{1}{32}, \frac{1}{16}$
5.1e	$\frac{1}{8192}, \frac{1}{4096}, \frac{1}{2048}, \frac{1}{1024}, \frac{1}{512}, \frac{1}{256}, \frac{1}{128}, \frac{1}{64}, \frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{1}{10}$

Tabuľka 5.2: Tabuľka zobrazujúca časy uzávierok zdrojových snímok použitých na zloženie výslednej HDR snímky

HDR scény. Rovnako ale nemá zmysel robiť LDR fotiek príliš veľa, nakoľko od istého bodu je už dynamický rozsah scény zachytení celý a ďalšie fotky navyše, by už nijako ku kvalite výsledku nepomohli.

Na snímke 5.1a je viditeľné prepálenie oblasti okna. Nie sú viditeľné ani žalúzie a krajina v pozadí. Pri použití 5 fotografií (obrázok 5.1b) je už z časti viditeľná krajina za oknom aj vonkajší múr budovy. Stále však dochádza k preexponovaniu oblohy. So zvyšujúcim sa počtom snímok dochádza k získaniu kvalitnejšieho výsledku.

Obrázok 5.1e má najuspokojivejšie výsledky. Kombináciou 11 rôznych expozícií došlo k zachyteniu celého dynamického rozsahu scény, čím vznikla fotografia bez prepálených a príliš tmavých miest. Tmavé žalúzie sú jasne viditeľné, pričom svetlé pozadie, nachádzajúce sa za nimi, nie je preexponované. Celkovo obrázok pôsobí prirodzene a zobrazenie scény je porovnateľné s ľudským okom.

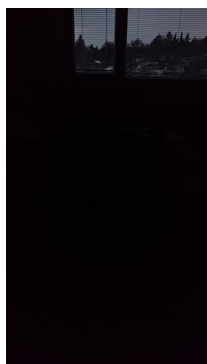
5.3 Porovnanie použitých operátorov

V nasledujúcej časti budú opísané a zobrazené výsledky jednotlivých operátorov tónového mapovania implementovaných v cieľovej aplikácii. Okrem porovnávania výsledku z vizuálneho hľadiska, dôjde k porovnaniu časovej náročnosti týchto operátorov.

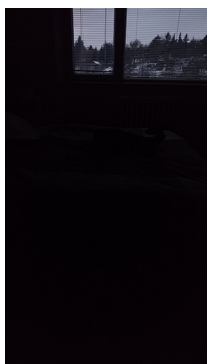
Operátor tónového mapovania	Doba aplikácie operátora [s]
Reinhardov globálny operátor (OpenCV)	2.111
Dragov adaptívny globálny operátor (OpenCV)	1.548
Reinhardov globálny operátor	1.894
Dragov adaptívny globálny operátor	1.935
Lokálny operátor založený na teórii Retinex	6.546

Tabuľka 5.3: Tabuľka zobrazujúca časy potrebné na úpravu HDR snímok operátormi tónového mapovania. Výsledná hodnota zobrazená v tabuľke bola získaná ako aritmetický priemer troch meraní za snímání troch rozličných scén.

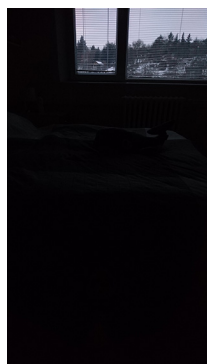
V tabuľke 5.3 je zoznam použitých operátorov a časy potrebné na ich prevedenie. Tieto operátory boli aplikované na HDR snímok vzniknutý kombináciou nasledovných 11 fotografií, zobrazených na obrázku 5.2, na mobilnom zariadení Sony Xperia X Compact. Na predvedenie funkcie jednotlivých operátorov, je k snímku vzniknutému zo sekvencie uvedenej nižšie, pridaný ešte snímok odlišnej scény. Rozlíšenie použité pri zachytávaní jednotlivých snímkov bolo 3840 na 2160 pixelov. Výsledky jednotlivých operátorov sú prezentované nižšie v tejto kapitole.



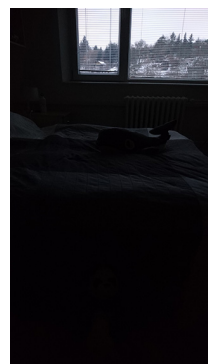
(a) $\frac{1}{8192}\text{s}$



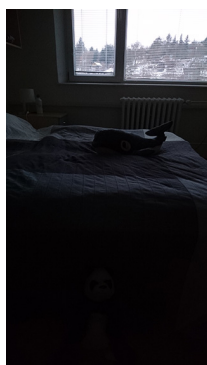
(b) $\frac{1}{4096}\text{s}$



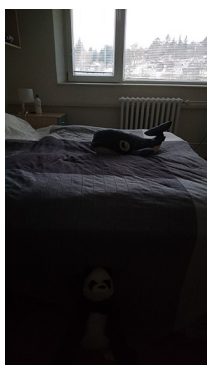
(c) $\frac{1}{2048}\text{s}$



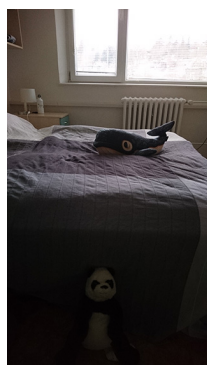
(d) $\frac{1}{1024}\text{s}$



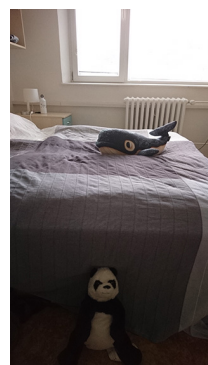
(e) $\frac{1}{512}\text{s}$



(f) $\frac{1}{256}\text{s}$



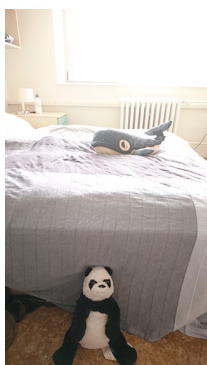
(g) $\frac{1}{128}\text{s}$



(h) $\frac{1}{64}\text{s}$



(i) $\frac{1}{32}\text{s}$



(j) $\frac{1}{16}\text{s}$

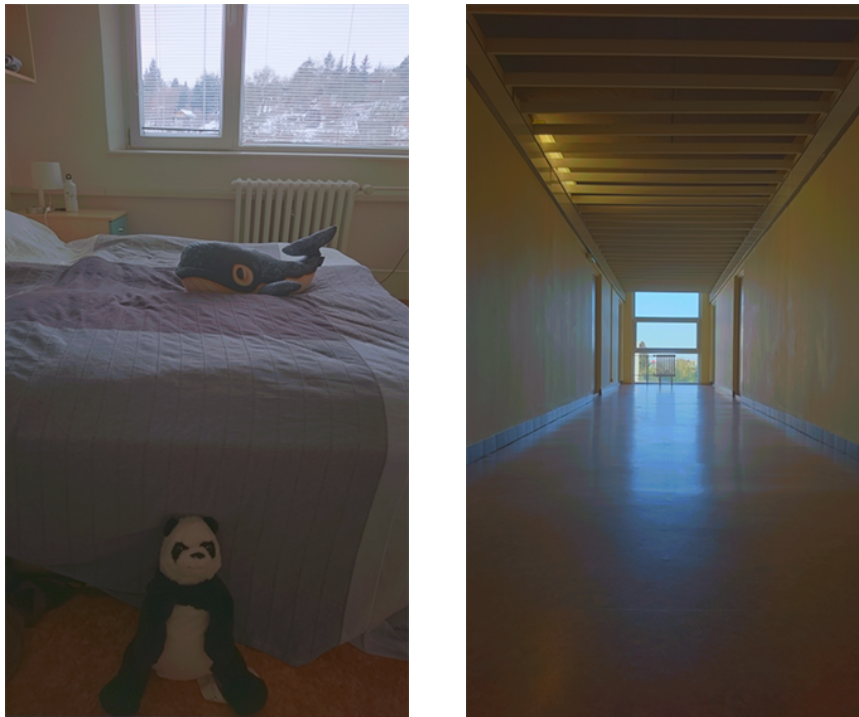


(k) $\frac{1}{10}\text{s}$

Obr. 5.2: Sekvencia LDR snímkov použitá na konštrukciu HDR snímky. Pod každým snímkom sa nachádza čas uzávierky, použitý pri jeho zachytení.

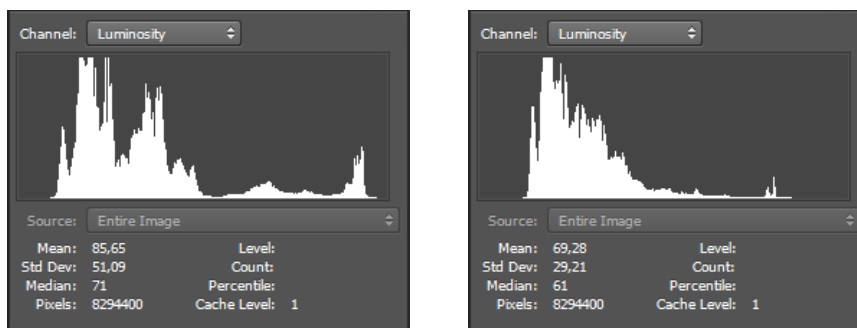
Reinhardov globálny operátor (OpenCV)

Jedná sa o najpomalší globálny operátor, aj napriek tomu, že celá realizácia tohto operátora je implementovaná v knižnici OpenCV, prevádzajúcej kód natívne. Tónovým mapovaním sekvencie obrázkov (obrázok 5.2), vznikol snímok zobrazený na obrázku 5.3 vľavo.



Obr. 5.3: Výsledok tónového mapovania Reinhardovým operátorom implementovaným v knižnici OpenCV.

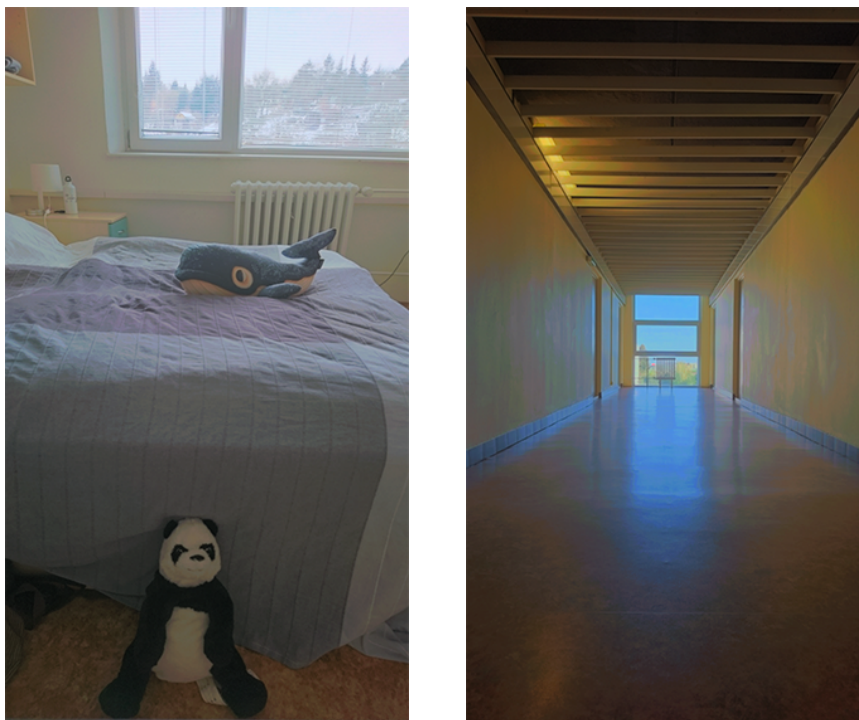
Operátor poskytuje dostatočné výsledky. Na ľavom obrázku je krajina v pozadí viditeľná a v žiadnych jej oblastiach nedochádza k preexponovaniu. Až na spodnú oblasť, kde snímka pôsobí, že dochádza k “splývaniu” detailov v tmavej časti deky. Rovnaký problém nastáva aj u textúry podlahy. Na histograme uvedenom na obrázku 5.4 sú zobrazené histogramy jasů týchto snímok. Ako je z tohto obrázkov zrejmé, prevažujú tmavé tóny. Voči želanému výsledku je týchto tmavých tónov až príliš veľa. Na druhú stranu je viditeľné, že na žiadnych miestach sa na snímkach nenachádzajú úplne tmavé alebo svetlé body.



Obr. 5.4: Histogramy jasů snímok 5.3, v rovnakom podarí.

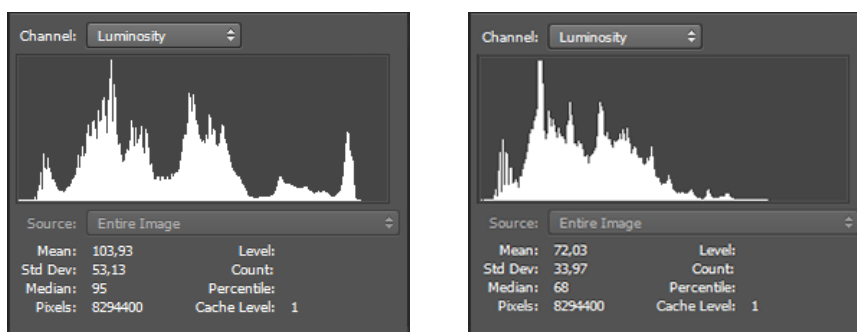
Reinhardov globálny operátor

Jedná sa o variantu Reinhardovho globálneho operátora implementovanú autorom práce. Táto varianta Reinhardovho operátora bola v úpravách snímkov o 10 % rýchlejšia a poskytla aj kvalitnejšie výsledky oproti OpenCV implementácii. Snímky upravené týmto operátorom sú zobrazená na obrázku 5.5.



Obr. 5.5: Výsledky tónového mapovania Reinhardovým operátorom, implementovaným autorom práce.

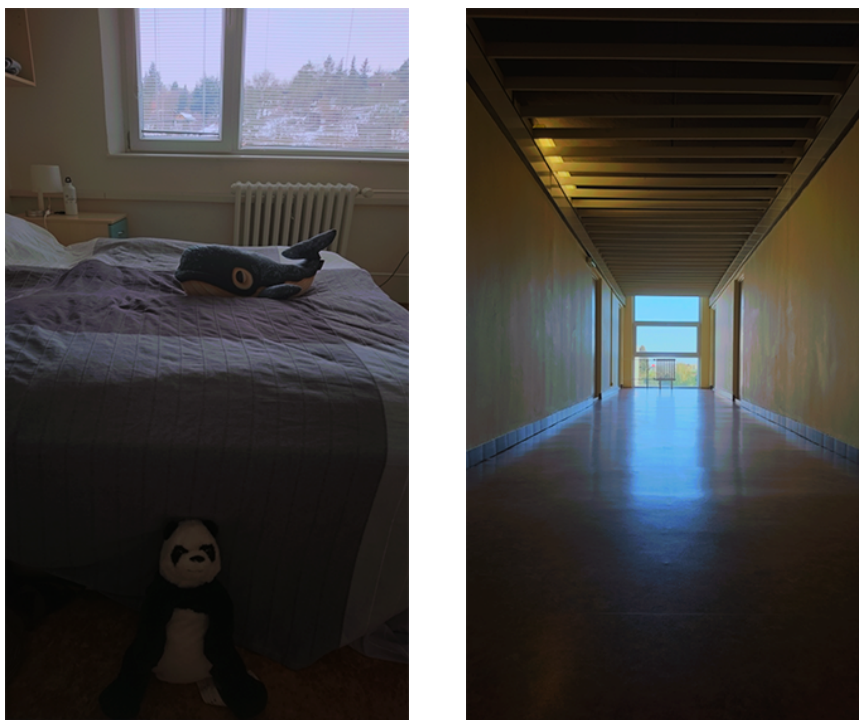
Oproti snímkam 5.3 sú snímky zobrazené v 5.5 svetlejšie. Čo dokazujú aj histogramy na obrázku 5.6, kde sú jednotlivé jasy rovnomernejšie zastúpené. Hlavný rozdiel je v dolnej časti, kde použitím tohto operátora vznikol na oboch snímkoch v tmavšej oblasti kontrastnejší, vierohodnejší výsledok.



Obr. 5.6: Histogramy jasu snímok 5.5, v rovnakom poradí.

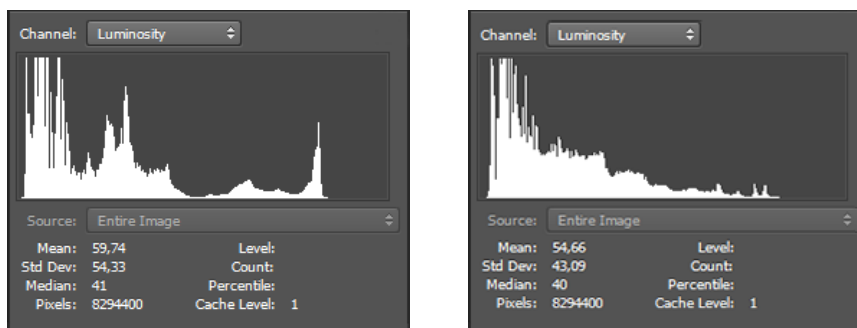
Dragov globálny operátor (OpenCV)

S priemerným časom úpravy HDR snímok 1.548 sekundy sa jedná o najrýchlejší z použitých operátorov. Kvalita výsledku je však nepostačujúca. Hoci svetlé pozadie je dobre viditeľné a nedochádza k prepalovaniu, tmáva časť je však až príliš stmavená, čím dochádza k strate veľkého množstva detailov. Bez dodatočného zvýšenia jasu je problematické rozoznať na ľavej snímke podlahu a koniec deky. V pravej snímke dochádza taktiež k strate detailov v tmavej oblasti, obzvlášť pri textúre podlahy. Výsledky sú zobrazené na obrázku 5.7.



Obr. 5.7: Výsledky tónového mapovania adaptívnym operátorom od Draga, implementovaným v knižnici OpenCV.

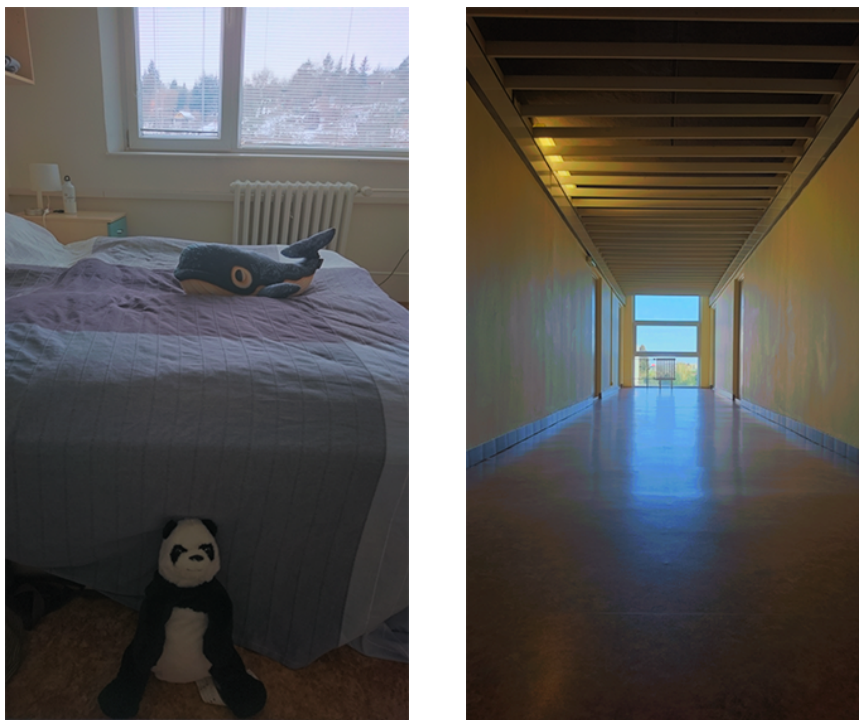
Tvary histogramov jasu snímky, zobrazené na obrázku 5.8, sú odpovedajúce nedostačujúcim výsledkom. Väčšina hodnôt bodov je úplne v ľavej časti, čo značí že sú príliš tmavé až čierne. Oproti predchádzajúcim operátorom sa jedná o značné zhoršenie. Jedinou výhodou použitia tohto operátora je rýchlosť spracovania.



Obr. 5.8: Histogramy jasu snímok 5.5, v rovnakom podarí.

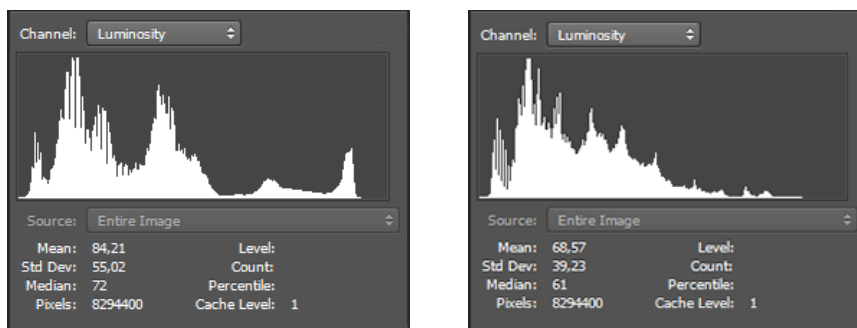
Dragov globálny operátor

Táto varianta Dragovho adaptívneho operátora bola implementovaná autorom tejto práce. Tónové mapovania operátorom trvalo v priemere 1.935 sekundy, čo predstavuje približne 25% nárast oproti OpenCV implementácii, no za cenu výrazného zlepšenia grafických výsledkov. Tieto výsledky sú zobrazené na obrázku 5.9.



Obr. 5.9: Výsledky tónového mapovania adaptívnym operátorom od Draga, implementovaným autorom práce.

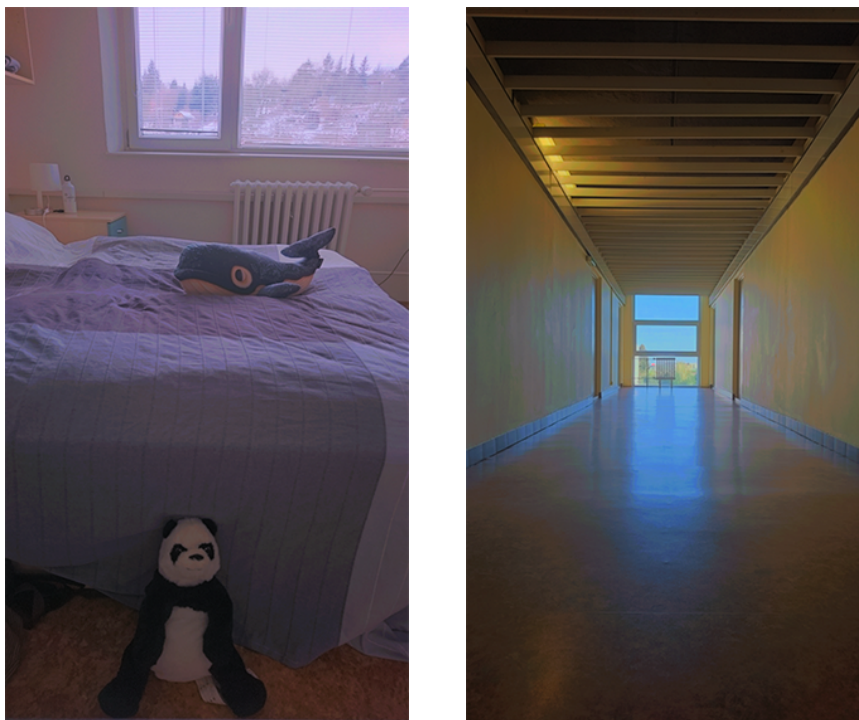
Vo svetlých častiach snímok došlo oproti snímkom 5.7 len k malým zlepšeniam vo svetlosti a detailnosti. Hlavný pokrok nastal v tmavších častiach scén, kde sa na ľavom snímku v 5.9 je zreteľný prechod medzi podlahou a dekou, a na pravom snímku je viditeľnejší detail podlahy. Tieto vylepšenia potvrdzujú aj hodnoty zobrazené v histogramoch jasu na snímok 5.10. Priemerná hodnota jasu snímky, na rozsahu 0 až 255, sa zvýšila z predchodších 59.74 na 84.21 u ľavej snímky a z 54.66 na 68.57 u pravej snímky.



Obr. 5.10: Histogramy jasu snímok 5.6, v rovnakom poradí.

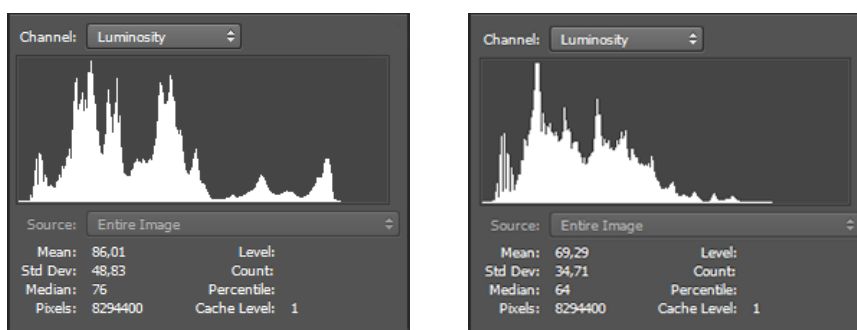
Lokálny operátor založený na teórii Retinex

Typu operátoru odpovedá aj doba jeho spracovania. S priemerným spracovaním o dĺžke 6.546 sekúnd sa jedná o najpomalší operátor. Je to spôsobené tým, že po globálnej transformácii dochádza ešte k úprave lokálnou adaptáciou daného operátora. Výsledky sú zobrazené na obrázku 5.11.



Obr. 5.11: Výsledky tónového mapovania lokálnym operátorom založeným na teórii Retinex

Použitím operátora došlo k získaniu postačujúcich výsledkov. Snímka vyzobrazuje svetlé oblasti bez preexponovania a tmavé bez podexponovania, čím došlo k splneniu požiadavkov na výsledok. Nežiadaným efektom použitia tohto operátora je jemné zafarbenie ľavej snímky do červena. Toto zafarbenie našťastie nemá moc veľký vplyv na výsledok. Oproti ostatným výsledkom, je možné pri priblížení snímok v plnej kvalite vidieť úbytok artefaktov v okolí hrán. Histogramy hodnôt jasu sú zobrazené na obrázku 5.12.



Obr. 5.12: Histogramy jasu snímok 5.11, v rovnakom podarí.

5.4 Hodnotenie výsledkov užívateľmi

Na základe získaných výsledkov bol vytvorený dotazník, ktorý mal za cieľ zistiť preferencie použitých operátorov u užívateľov. Je nutno dodať, že užívatelia vyberali operátory len na základe ich výsledku, bez informácií o časovej náročnosti jednotlivých operátorov.

Ešte pred vyhodnotením samotných snímkov bol v skratke vysvetlený pojem HDR fotografie a bolo zisťované, či sa respondentní stretli s týmto pojmom. Z 73 respondentov len 10 nepoznalo tejto pojem, čo je približne očakávaný výsledok.

Nasledujúca otázka sa už zameriavala na hodnotenie kvality výstupnej HDR snímky. Boli prezentované výsledné HDR snímky, zložené zo sekvencie na obrázku 5.2, po aplikácii operátorov tónového mapovania z predchádzajúcej časti tejto kapitoly. K týmto snímkom bol pridaný ešte jeden snímok, ktorý nebol nijako upravovaný a nebol ani HDR. Tento snímok je zobrazený na obrázku 5.13. Úlohou respondentov bolo označiť snímky, ktoré svojou podobou najviac odpovedajú tomu, ako by túto scénu vnímali respondenti vlastnými očami.



Obr. 5.13: LDR snímok prezentovaný v porovnaní s HDR výslednými snímkami

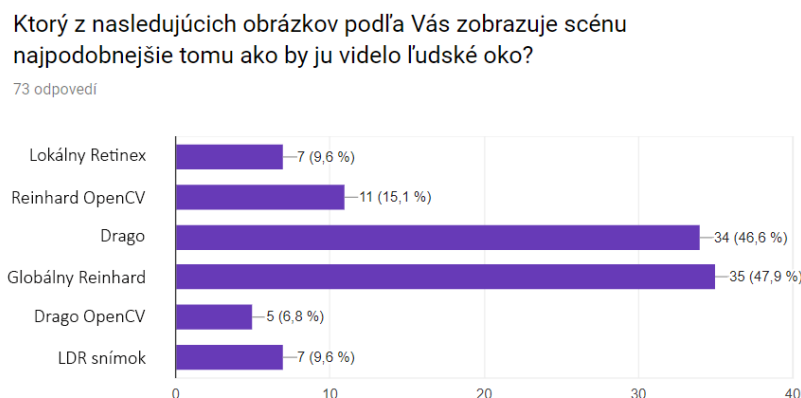
Za najreálnejší výsledok snímania scény, v porovnaní s ľudským okom, bol označený snímok upravený Reinhardovým globálnym operátorom v autorovej implementácii. Za tento snímok hlasovalo 35 ľudí, čo odpovedá približne 47.9% hlasom. Jedná sa o snímok zobrazený na obrázku 5.5 vľavo.

Druhý najuspokojivejší výsledok je podľa respondentov získaný úpravou Dragovým adaptívnym operátorom (obrázok 5.9 vľavo) v autorovej implementácii. Hlasovalo za neho až 34 respondentov, čo tvorí 46.6% hlasov.

Z výsledkov vyplýva, že najmenej uspokojivý výsledok je dosiahnutý použitím Dragovho operátora implementovaného v knižnici OpenCV (obrázok 5.7 vľavo). Dostal len 6.8% z cel-

kových hlasov, čím ho užívatelia označili ako najmenej reálnym v porovnaní s vnímaním scény ľudským okom.

Celkový prehľad výsledkov je zobrazený na obrázku 5.14.



Obr. 5.14: Grafický prehľad výsledkov dotazníka

Predmetom poslednej otázky boli preferencie využitia aplikácie na tvorbu HDR snímku zo sekvencie LDR snímkov u užívateľov. S priemernou dobou tvorby výsledného HDR snímku o dĺžke 30 až 35 sekúnd bolo zisťované, či by užívatelia takúto aplikáciu použili. Vo výsledku by dostali kvalitnejšiu snímku, no za cenu časovo náročnejšieho spracovania. Zo 73 respondentov by až 55 takúto aplikáciu použilo, jedná sa približne o 75.3% opýtaných.

5.5 Možné vylepšenia

Vytvorená aplikácia umožňuje nasnímanie a zobrazenie HDR scény v uspokojujúcej kvalite za určitých podmienok. Redukciu podmienok, ktorých splnenie je potrebné na získanie HDR snímku v žiadúcej kvalite, je možné doceliť dodatočnou implementáciou nasledujúcich mechanizmov.

Pri návrhu a implementácii aplikácie bolo uvažované len o statickej scéne. Pokiaľ by počas snímania scény došlo k pohybu objektov v tejto scéne umiestnených, došlo by vzniku nežiadúcich artefaktov v podobe “duchov”. Rovnaký následok by mal aj pohyb zariadenia počas snímania sekvencie LDR fotografií. Možným pokračovaním práce, a vylepšením aplikácie, je implementácia mechanizmu zarovnania zachytených LDR snímkov. Metódy popisujúce odstránenie artefaktov vo forme “duchov”, vzniknutých nestatickosťou scény, sú popísané v [13] a [22].

Aplikáciu je ďalej možné vylepšiť o dynamické nastavenie expozície prostrednej fotografie LDR sekvencie. Výsledok nastavenia správnej expozície prostrednej fotografie by bol najzreteľnejší pri snímaní príliš tmavej alebo svetlej scény za použitia LDR sekvencie o dĺžke troch fotografií. Došlo by k eliminácii chyby, kedy by všetky fotografie sekvencie boli podexponované alebo preexponované. Namiesto takto podexponovaných (preexponovaných) snímkov by vznikli 3 fotografie - podexponovaná, správne naexponovaná a preexponovaná, čím by došlo k zvýšeniu zachyteného dynamického rozsahu. Zlepšenie by bolo viditeľné i za použitia 5 a 7 fotografií použitých na skladanie výsledného HDR snímku. Pri 11 fotografiách by už k lepšiemu výsledku dôjsť nemohlo, nakoľko 11 fotografií používa celý rozsah podporovaných časov uzávierok na testovacom zariadení.

Kapitola 6

Záver

Cieľom tejto práce bolo získanie vedomostí študovaním dostupnej literatúry, týkajúcej sa HDR tematike s dôrazom na zhotovenie HDR snímky zo sekvencie LDR snímkov s rôznou expozíciou, a následná implementácia aplikácie vykonávajúcej tento proces.

Informácie získané štúdiou literatúry sú popísané v kapitole 2. Samotná kapitola sa skladá z 3 častí. Prvej časti vysvetľujúcej základné pojmy a princípy vnímania scény, druhej časti zameranej na možnosti snímania HDR snímkov a tretej, najobsiahlejšej a najzložitejšej časti, zaoberajúcej sa zobrazovaním HDR snímkov a tónovému mapovaniu.

Na základe získaných teoretických znalostí v kapitole 2 bol v kapitole 3 vytvorený konceptuálny návrh aplikácie ako z funkčného tak aj z grafického hľadiska. Vzhľadom na nie úplnú presnosť detailov návrhu došlo k oddýchelke od tohto návrhu pri implementácii. Na výslednú funkčnosť aplikácie to však efekt nemalo.

Popis implementácie navrhnutého konceptuálneho modelu je obsahom kapitoly 4. Okrem popisu použitých technológií je znázornený aj diagram triednych závislostí a podrobný popis funkcie jednotlivých tried. Hlavnou triedou je trieda `CaptureActivity`, ktorej úlohou je pomocou Camera2 API zachytenie sekvencie LDR fotiek a jej predanie triede `MergeHDR`, ktorej výstupom je výsledný HDR snímok po mapovaní tonality.

Výsledky získané finálnou implementáciou aplikácie sú prezentované v kapitole 5 spolu s ich hodnotením od autora práce a rovnako od užívateľov, ktorý vyplnili stručný dotazník. Dotazník sa skladal z otázok, ktoré skúmali preferencie respondentov na jednotlivé použité operátory a ich ochotu použiť takéto snímanie scény. V tejto kapitole sú prezentované aj budúce možné vylepšenia aplikácie a pokračovania práce.

Výsledkom celej práce je aplikácia umožňujúca tvorbu HDR fotografií a ich následné zobrazenie na konvenčnom mobilnom zariadení. Užívateľ používajúci túto aplikáciu má na výber použitie viacerých operátorov tónového mapovania, čo mu umožňuje vybrať si ten, ktorý je podľa neho najvhodnejší. Má možnosť porovnania dvoch rôznych implementácií tónových operátorov - implementáciu v knižnici OpenCV a autorovu implementáciu. S maximálnou dobou spracovania približných 45 sekúnd, za použitia lokálneho mapovania a snímania 11 fotiek, je aplikácia stále prijateľne časovo náročná.

Literatúra

- [1] Ahn, H.; Keum, B.; Kim, D.; aj.: *Adaptive local tone mapping based on retinex for high dynamic range images*. In *2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, Jan 2013, ISSN 2158-3994, s. 153–156, doi:10.1109/ICCE.2013.6486837.
- [2] *CCD and CMOS sensor technology*. [Online; navštíveno 14.11.2017].
URL https://www.axis.com/files/whitepaper/wp_ccd_cmos_40722_en_1010_lo.pdf
- [3] *android.hardware.camera2*. [Online; navštíveno 22.2.2018].
URL <https://developer.android.com/reference/android/hardware/camera2/package-summary.html>
- [4] Debevec, P.: *Image-Based Lighting*. [Online; navštíveno 9.12.2017].
URL <http://ict.usc.edu/pubs/Image-Based%20Lighting.pdf>
- [5] Debevec, P. E.; Malik, J.: *Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs*. [Online; navštíveno 10.12.2017].
URL <https://inst.eecs.berkeley.edu/~cs194-26/fa16/Papers/debevec97.pdf>
- [6] Dolejší, T.: *EV, neboli expoziční hodnota tajemství zbavená*. [Online; navštíveno 10.12.2017].
URL <https://www.fotoradce.cz/ev-neboli-expozicni-hodnota-tajemstvi-zbavena>
- [7] Drago, F.; Myszkowski, K.; Annen, T.; aj.: *Adaptive Logarithmic Mapping For Displaying High Contrast Scenes*. ročník 22, 09 2003.
- [8] Freeman, M.: *Základy HDR - Fotografie a vysoký dynamický rozsah*. Zoner Press, 2008, ISBN ISBN 978-80-86815-95-4.
- [9] Gamal, A. E.; Eltoukhy, H.: *CMOS image sensors*. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, ročník 21, č. 3, May 2005: s. 6–20, ISSN 8755-3996, doi:10.1109/MCD.2005.1438751.
- [10] Guinness, H.: *What Is Your Camera's ISO Setting?* [Online; navštíveno 9.12.2017].
URL <https://www.howtogeek.com/302755/what-is-your-cameras-iso-setting/>
- [11] *Tone Mapping in HDR. What It is and How to Use It?* [Online; navštíveno 12.12.2017].
URL <https://macphun.com/blog/what-is-tone-mapping>

- [12] He, K.; Sun, J.; Tang, X.: *Guided Image Filtering*. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, ročník 35, č. 6, June 2013: s. 1397–1409, ISSN 0162-8828, doi:10.1109/TPAMI.2012.213.
- [13] Khan, E.; Akyuz, A.; Reinhard, E.: *Ghost Removal in High Dynamic Range Images*. 11 2006.
- [14] Lansroth, B.: *First Picture Ever Taken - Importance of World's First Photographs*. Srpen 2015, [Online; navštíveno 3.11.2017].
URL <https://www.widewalls.ch/first-picture-ever-taken-importance-worlds-first-photographs/>
- [15] Mansurov, N.: *Understanding Shutter Speed*. [Online; navštíveno 9.12.2017].
URL <https://photographylife.com/what-is-shutter-speed-in-photography>
- [16] McCann, J.: *Retinex Theory*. New York, NY: Springer New York, 2016, ISBN 978-1-4419-8071-7, s. 1118–1125, doi:10.1007/978-1-4419-8071-7_260.
URL https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8071-7_260
- [17] Qian, T. L.; Shafie, S.; Saripan, M. I.: *A local tone mapping operator for high dynamic range images*. In *2011 Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization*, April 2011, s. 1–6, doi:10.1109/ICMSAO.2011.5775495.
- [18] Reinhard, E.; Heidrich, W.; Debevec, P.; aj.: *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*. Morgan Kaufmann, 2010, ISBN ISBN 978-0-12-374914-7.
- [19] Reinhard, E.; Stark, M.; Shirley, P.; aj.: *Photographic Tone Reproduction for Digital Images*. *ACM Trans. Graph.*, ročník 21, č. 3, Červenec 2002: s. 267–276, ISSN 0730-0301, doi:10.1145/566654.566575.
URL <http://doi.acm.org/10.1145/566654.566575>
- [20] Rowse, D.: *Introduction to Aperture in Digital Photography*. [Online; navštíveno 15.11.2017].
URL <https://digital-photography-school.com/aperture/>
- [21] Seetzen, H.; Heidrich, W.; Stuerzlinger, W.; aj.: *High Dynamic Range Display Systems*. *ACM Trans. Graph.*, ročník 23, č. 3, Srpen 2004: s. 760–768, ISSN 0730-0301, doi:10.1145/1015706.1015797.
URL <http://doi.acm.org/10.1145/1015706.1015797>
- [22] Sidibe, D.; Puech, W.; Strauss, O.: *Ghost detection and removal in High Dynamic Range Images*. In *2009 17th European Signal Processing Conference*, Aug 2009, s. 2240–2244.
- [23] Smith, W. E.: *Modern Optical Engineering*. SPIE Press, 2007, ISBN ISBN 00-71476-87-3, 768 s.
- [24] *SpheroCam HDR*. [Online; navštíveno 9.12.2017].
URL http://www.grafixgear.com/HTML/PDF/SpheroCam_HDR.pdf

- [25] Spring, K. R.; Fellers, T. J.; Davidson, M. W.: *Human Vision and Color Perception*. [Online; navštíveno 14.11.2017].
URL <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/lightandcolor/humanvisionintro/>
- [26] Trigwell, K.: *Understanding Reciprocity in Photography*. [Online; navštíveno 10.12.2017].
URL <https://www.picturecorrect.com/tips/understanding-reciprocity-in-photography/>
- [27] Videni.cz: *Jak pracuje lidské oko*. Únor 2010, [Online; navštíveno 3.11.2017].
URL <http://www.videni.cz/oko/36-jak-pracuje-lidske-oko>
- [28] *Xperia X Compact*. [Online; navštíveno 24.2.2018].
URL <https://www.sonymobile.com/global-en/products/phones/xperia-x-compact/specifications/>

Príloha A

Ukážka HDR snímkov

Obsahom tejto prílohy bude ukážka typických HDR snímkov.



Obr. A.1: Ukážka HDR snímky vzniknutej za pomoci kamery SpheroCam Spheron3 HDR.¹

¹Zdroj: <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/pages/originals.html>

²Zdroj: <http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/pages/originals.html>

³Zdroj: https://docs.opencv.org/3.1.0/d2/df0/tutorial_py_hdr.html



Obr. A.2: Ukážka HDR snímky po aplikovaní operátora od autora Warda Larsona (1998).²



Obr. A.3: HDR snímka vytvorená zo sekvencie LDR fotiek algoritmom od Debeveca a Malik.³

Príloha B

Obsah priloženého CD

K tejto práci je priložené aj CD obsahujúce nasledujúcu adresárovú štruktúru:

- **application** - zdrojové súbory aplikácie
- **thesis** - zdrojové súbory a technická správa
 - **src** - zdrojové súbory práce v jazyku \LaTeX
 - **ethesis** - technická správa bakalárskej práce v elektronickej podobe
- **images** - použité obrázky v plnom rozlíšení
 - **count_test** - obrázky z testu na vplyv počtu fotografií
 - **intro** - obrázky z úvodu
 - **tonemap_steps** - obrázky jednotlivých krokov tónového mapovania
 - **comparison** - obrázky použité v porovnaní použitých operátorov
 - **ldr_seq** - LDR sekvencia použitá na vytvorenie HDR snímky